Beitrag zur Ermittlung der Schwingungs- und Schlagfestigkeit geschweißter Stahlbauverbindungen und zu deren schweißgerechten Ausbildung

---

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Karl Jurczyk
aus Georgsmarienhütte

Referent:
Professor W. Rein

Korreferent:
Professor Gottwein

Tag der mündlichen Prüfung: 31. Juli 1933

Universitätsverlag von Robert Noske in Borna-Leipzig
1933

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhalt.

Seite

Einleitung: Gegenwärtiger Stand der Schweißtechnik und ihre Anwendungsgebiete 1

Schwingungs- und Schlagversuche an Schweißverbindungen 1

1. Untersuchungen an Rundstäben 1
2. Untersuchungen an Rohrverbindungen 2
3. Untersuchungen an einfachen Konstruktionselementen 2
4. Untersuchungen an größeren Konstruktionselementen und ganzen Konstruktionen 5
5. Wirkung von Eigenschwingungen 9

Konstruktive Gestaltung von Schweißverbindungen . . 10

1. Verhütung von Schweißspannungen und Schrumpfungen 10
2. Anwendung der gewonnenen Erfahrungen auf die schweißgerechte Ausbildung von Stahlbauverbindungen 16

Schluß 20

Literaturverzeichnis 21

Verzeichnis der Literaturhinweise 22

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545806_0038

Einleitung.

Gegenwärtiger Stand der Schweißtechnik und ihre Anwendungsgebiete.

Kein aufmerksamer Beobachter der technischen Entwicklung wird sich der Einsicht verschließen können, daß die modernen Schweißverfahren die konstruktive Gestaltung auf fast allen Gebieten der Technik umwälzend beeinflussen. Die Vorteile der Schweißtechnik, die in ihrer Einfachheit und Wirtschaftlichkeit liegen, können jedoch erst dann ausgenutzt werden, wenn man bei ihrer Anwendung ihrer Eigenart Rechnung trägt. Die Schweißtechnik erfordert ein vollkommenes Umstellen des Ingenieurs; er muß sich freimachen von jahrzehntelang geübten Herstellungsverfahren, die durch Verschraubung, Vernietung und Gießerei bestimmt sind.

Von den verschiedenen modernen Schweißverfahren hat jedes bestimmte Gebiete, auf denen es sich als besonders geeignet erwiesen hat. So hat die elektrische Lichtbogenschweißung für den Maschinen- und Stahlhochbau als Herstellungsverfahren eine große Bedeutung gewonnen. Daher wird auch die vorliegende Arbeit im wesentlichen bei den wiedergegebenen Untersuchungen und Betrachtungen auf dies Verfahren Bezug nehmen.

Die elektrische Lichtbogenschweißung wurde ursprünglich fast ausschließlich zur Wiederherstellung zerbrochener Maschinenteile angewandt. Dann erkannte man aber, daß dies Arbeitsverfahren auch bei Neuanfertigungen große technische und wirtschaftliche Vorteile bietet, und man begann, diese Vorteile nach Möglichkeit auszunutzen. Besonders Amerika ging großzügig auf diesem Wege voran. Dort waren bis Januar 1932 bereits über 183 Gebäude und 46 Brücken ganz oder größtenteils in geschweißter Ausführung fertiggestellt [1]). Ferner hat man Schiffe [2]) in allen Größen, Behälter, Kessel und Maschinen aller Art und Größen gebaut. Auch die deutsche Industrie hat tatkräftig, zum Teil führend, an dieser Entwicklung mitgearbeitet. Geschweißte Brücken [3]), Gebäude [4]), Schiffe [5]), Maschinen und Behälter [6]) sowie Rohrleitungen sind Zeugen fortschrittsfreudiger Arbeit.

Zunächst bestand keine andere Möglichkeit, als die Konstruktionen der geschweißten Bauten und Maschinen den alten Herstellungsverfahren, wie Nieten und Gießen, zu entlehnen. Auch rechnete man aus Mangel an Erfahrung mit zu großen Sicherheiten, der Gang der Fertigung war noch nicht in allen Einzelheiten durchdacht und organisiert; so konnten anfänglich nennenswerte Ersparnisse nicht gemacht werden. Allmählich wurden dann Konstruktionsformen entwickelt, die der Eigenart der Schweißtechnik besser angepaßt waren; darauf zeigten sich auch bald die erwarteten Ersparnisse. Bei Stahlbauten, Schiffen, Behältern u. a. sind sowohl Kosten- als auch Gewichtsersparnisse von 10 bis 30%, bei Maschinenteilen bis 60% festgestellt worden.

Wir stehen noch am Anfang dieser Entwicklung. Doch heute schon gibt es kaum ein Gebiet der technischen Fertigung, in dem die Schweißtechnik nicht dankbare Aufgaben gefunden und zum Teil verblüffend einfache und billige Lösungen gebracht hätte. Um aber alle Vorteile der modernen Schweißung für die Technik richtig auszuwerten, müssen noch viele Fragen geklärt werden; unter diesen sind es nicht zuletzt die Fragen der Festigkeit geschweißter Verbindungen, besonders bei Dauer-, Biegungs- und Schlagbeanspruchungen. Sie sollen auch Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein; ebenso sollen aber auch die hierbei gewonnenen Erkenntnisse und ihre Anwendung auf die Praxis angezeigt werden.

Schwingungs- und Schlagversuche an Schweißverbindungen.

Die technisch-wissenschaftliche Forschung hat sich in den letzten Jahren besonders eingehend mit der Dauerprüfung von Werkstoffen beschäftigt. Es lag nahe, daß man dabei auch die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen genauer untersuchte.

1. Untersuchungen an Rundstäben.

Zu den ersten Versuchen dieser Art gehörten solche mit Probestäben. Diese wurden zusammengeschweißt und dann überdreht. Oder es wurden Stäbe ganz aus niedergeschmolzenem Schweißwerkstoff hergestellt und mit Biegungs-Schwingungs-, Dreh-Schwingungs- und Zug-Druck-Maschinen (von Schenck, Föppl, Mohr & Federhaff, Amsler, MAN), mit Dauerschlagwerken (von Krupp u. a.) oder anderen Einrichtungen Dauerbelastungen unterworfen. Dabei fand man dann wohl, daß die Schweiße geringere Festigkeitseigenschaften besitzt als gewalzter Werkstoff. Das ist auch verständlich, wenn man bedenkt, daß das Schweißen ein Gießvorgang ist, und daß das Gefüge gewalzten Materials durch das Walzen zäher und feiner wird.

Übrigens waren die Ergebnisse dieser und anderer Versuche und die dabei gefundenen Werte so verschieden, daß sie nicht miteinander in Einklang gebracht werden konnten und mehr Verwirrung als Aufklärung brachten. Bartels [7]) fand auf der Schenkschen Biegungs-Schwingungs-Maschine für St 37 ungeschweißt 26—28 kg/mm² Dauerschwingungsfestigkeit, geschweißt etwa 22 kg/mm², geschweißt und gehämmert etwa 25—26 kg/mm². Garre und Gerbes [8]) fanden auf der Dreh-Schwingungs-Maschine der MAN für St 37 ungeschweißt 15,7 kg/mm², geschweißt 13,5 bis 14,4 kg/mm² Festigkeit. Die Versuche von G. E. Thornton [9]) ergaben bei den verschiedenen Schmelzschweißverfahren Dauerfestigkeitswerte, die zwischen 6 und 18 kg/mm² lagen. Weinmann [10]) fand für Stäbe aus reiner Schweiße 22—26 kg/mm², bei Stäben mit „V"-Schweißung 14—16 kg/mm² Dauerschwingungsfestigkeit. Bei anderen amerikanischen Versuchen [11]) wurden an zusammengeschweißten Stäben in bearbeitetem Zustand 8,8 kg/mm², in unbearbeitetem Zustand 10,7 kg/mm² gefunden.

Solche stark schwankenden Ergebnisse sind durch verschiedene Ursachen veranlaßt worden: Zunächst ist hier das Größenverhältnis der Proben zueinander zu nennen. Bei größeren Proben fallen unvermeidliche Poren und Schweißfehler nicht so sehr ins Gewicht als bei kleinen. Ferner ist die Bedeutung der Probenform für die Festigkeit der Proben aus statischen Versuchen seit langem bekannt. Durch Änderung der Form eines Zerreißstabes kann man z. B. für den gleichen Stahl St 37 Zerreißfestigkeiten zwischen 39 und 64 kg/mm² erhalten [12]). Auch der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit ist schon von vielen Forschern nachgewiesen worden. Noch aufzuklären bleibt der Einfluß des Prüfverfahrens selbst, der Maschine sowie der Periodenzahl der Lastwechsel [13]). Vor allem ist es noch ganz ungeklärt, ob und wie sich der Elastizitätsmodul bei hochfrequenten Schwingungen ändert. Daß sich im plastischen Gebiet der Formänderungswiderstand mit der Verformungsgeschwindigkeit ändert, ist bekannt [14]); es ist anzunehmen, daß auch im elastischen Gebiet Abhängigkeiten irgendwelcher Art vorhanden sind [13]). Von großer Bedeutung sind die Art und Güte des Schweißverfahrens und des Schweißzusatzwerkstoffes. Diese Einflüsse sind besonders vielgestaltig und werden durch den Stand der Erfahrungen bestimmt, über die die Betriebe verfügen, welche die Proben herstellen. Nur selten wird es gelingen, einen dem Grundwerkstoff völlig gleichen Zusatzwerkstoff einzuschweißen; jede weichere oder härtere Stelle bedeutet aber einen Knick in der elastischen Biegungslinie des Versuchsstabes und damit eine örtliche Steigerung der Prüfspannungen, deren Höhe kaum angegeben werden kann. Schließlich sei noch auf die inneren Spannungen hingewiesen, von denen selten eine Schweißverbindung frei ist, und die das Versuchsergebnis weitgehend beeinflussen können.

2. Untersuchungen an Rohrverbindungen.

Die Erkenntnis, daß man die an kleinen Rundstäben gewonnenen Versuchsergebnisse kaum auf ganze Konstruktionen übertragen kann, war der Anlaß dazu, daß zahlreiche Versuche mit Konstruktionselementen durchgeführt wurden. Man untersuchte geschweißte Rohrverbindungen, die aus verschiedenen Stahlsorten hergestellt waren [15]) und man fand für diese Dauerfestigkeitswerte, die etwa 40—60% der Werte des ungeschweißten Werkstoffs betrugen. Obgleich die Schweißungen teilweise verdickt hergestellt waren, trat der Bruch meist in der Schweiße oder dicht daneben bei der angegebenen niedrigen Beanspruchung ein. Es wurde versucht, diese geringe Dauerfestigkeit mit der gegenüber dem normalen Baustoff geringeren Güte der Schweißnaht und mit der Einbrandzone, die angeblich eine Schwächung des Querschnitts bedeutete, zu erklären. Aber selbst wenn die Schweiße die gleichen Eigenschaften hätte wie das Grundmaterial, und wenn eine Schwächung des Querschnitts in der Einbrandzone nicht vorhanden wäre, so würde der Bruch doch an den gleichen Stellen, etwa bei den gleichen niedrigen Beanspruchungen aufgetreten sein; denn die Schweißung wirkt wie ein Schrumpfring und erzeugt in dem angeschlossenen Rohr Spannungen. Bei verdickten Schweißungen tritt außerdem noch die Querschnittsänderung hinzu, die einen Knick in der Biegungslinie des Rohres bedeutet. Günstigere Werte würde man z. B. erhalten, wenn man in einigem Abstand von der Stoßschweißung nach beiden Seiten weitere Schweißraupen um das Rohr herumlegte. Diese wirken dann versteifend etwa wie die Knoten an Bambusstäben, indem sie die Einbeulungsgefahr herabmindern [16]). Da es, wie oben gesagt, sehr schwierig ist, der Schweißverbindung und dem Grundwerkstoff die gleichen Eigenschaften zu geben, so muß selbst bei einer in jeder Hinsicht ausgezeichneten Schweißnaht an dieser der Bruch eintreten, weil auch aus diesem Grunde eine Störung im gleichmäßigen Verlauf der elastischen Linie vorhanden ist.

Trotzdem ist es möglich, auch bei ganzen, geschweißten Rohrkonstruktionen die volle Dauerfestigkeit des ungeschweißten Materials auszunutzen, da man die Schweißverbindungen konstruktiv so anordnen kann, daß sie geringer beansprucht sind, als es bei dem einzelnen verbundenen Rohrelement, etwa in der Mitte zwischen den Schweißstellen, der Fall ist. Hierüber wird noch an anderer Stelle eingehender berichtet werden.

3. Untersuchungen an einfachen Konstruktionselementen.

Auch Konstruktionselemente wurden zu Dauerversuchen herangezogen und das Verhalten genieteter und geschweißter Verbindungen miteinander verglichen [17]). Bei all diesen Versuchen war man bemüht, die zulässige Anstrengung der Werkstoffe unter Verhältnissen zu erkunden, die den praktischen Bedingungen entsprechen. Die vorhandenen Dauerprüfmaschinen gestatteten jedoch nur Versuche an verhältnismäßig einfach geformten und kleinen Verbindungen.

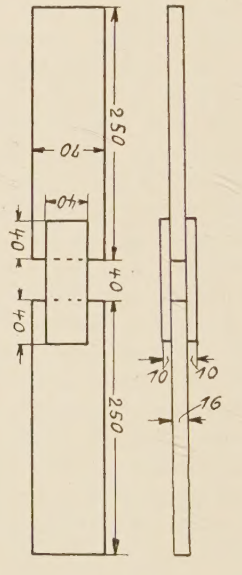


Abb. 1.

Es wurden Flachstäbe mit und ohne Bohrung, Nietverbindungen und Schweißverbindungen untersucht, von denen ein Teil der letztgenannten nach den Abmessungen wie Abb. 1 ausgeführt waren. Die Ergebnisse der Untersuchungen (s. 17 a—g) waren fast übereinstimmend und lösten in den Kreisen der Praxis große Überraschung aus, da sie im Gegensatz zu mehrjährigen Erfahrungen standen. Die geprüften Schweißverbindungen ergaben Dauerfestigkeiten von 7 bis 8 kg/mm² und lagen damit weit unter der Festigkeit genieteter

Konstruktionselemente. Besonders unangenehm überraschte es, daß Baustahl St 52 sowohl geschweißt als ungeschweißt keine wesentlich höhere Dauerfestigkeit besitzen sollte als St 37. Daraus wurde von Graf der Schluß gezogen, daß bei Verwendung von Schweißverbindungen zu Konstruktionselementen, die oftmals in weiten Grenzen schwingende Belastungen übernehmen, Vorsicht geboten wäre (s. 17 a, S. 42). Schächterle sagt sogar (17 f, S. 605), daß geschweißte Konstruktionen in Hinsicht auf Dauer- und Ermüdungsbruch nicht nur gleichwertigen genieteten Konstruktionen gegenüber keine Werkstoffersparnis ergeben, sondern sogar noch schwerer ausfallen als diese. Er wendet sich gegen die Vorschrift Din 4100, die nach seiner Ansicht in ungerechtfertigter Weise geschweißte Konstruktionen gegenüber genieteten bevorzugt, und fordert ihre Änderung.

Dem widersprechen zunächst die Untersuchungen von Dörnen [18]), die, allerdings bei niedrigen Frequenzen der Kraftrichtungswechsel von etwa 8/Min., ergeben haben, daß geschweißte Proben etwa die gleiche Dauerfestigkeit haben wie ungeschweißte, und daß St 52 trotz 50% höherer Spannung und starker Schwächung des Querschnitts die gleiche Sicherheit wie St 37 bietet. Diese Feststellungen begegnen sich mit denen von Memmler und Laute [13]), die eine mit steigendem C-Gehalt zunehmende Schwingungsfestigkeit ermittelten.

Die Angaben in den unter 17 genannten Arbeiten, die sich auf ausgedehnte und gewissenhaft durchgeführte Versuche stützen, sind geeignet, in allen Kreisen der Technik Unruhe, ja Bestürzung hervorzurufen. Es liegt daher für den Praktiker nahe, danach zu forschen, wie es möglich ist, daß die Untersuchungsergebnisse so ganz im Gegensatz zu seinen mit Vorsicht und Verantwortungsbewußtsein erworbenen Erfahrungen stehen können. In langjähriger Beobachtung hat der Verfasser festgestellt, daß bei richtig ausgeführter und angeordneter Schweißung diese auch bei dauernd schwingenden Belastungen unbedingt haltbare Verbindungen ermöglicht. In den großen Industriewerken, in denen der Verfasser tätig war und ist, wurden seit Jahren locker gewordene Nieten an Gütereisenbahnwagen, Kränen, Kranschienen, Kranbahnen und sonstigen Eisenkonstruktionen und Maschinen in großem Maße elektrisch verschweißt oder die Knotenbleche entfernt und die Profile durch Schweißung direkt miteinander verbunden. Im Laufe der Zeit hat sich dabei eine klare Überlegenheit der Schweißverbindungen gegenüber den Nietverbindungen gezeigt. Ein interessantes Ergebnis stellt der Versuch des Verfassers mit einem 5 t-Lastkraftwagen dar: für diesen wurden statt der üblichen Stahlgußräder solche aus Blech in geschweißter Ausführung verwendet; obgleich diese Räder im Gewicht um 65% leichter sind als Stahlgußräder, haben sie sich in 2 jährigem Betrieb bestens bewährt. Ebenso gute Erfahrungen wurden auch an anderen Stellen gemacht und bestätigt. So berichteten die Vertreter namhafter Maschinenfabriken, die Kräne, Raupenbagger, Schütteleinrichtungen u. a. bauen, auf den schweißtechnischen Tagungen in Düsseldorf am 12. Januar 1931 und 25. Nov. 1932, daß es den betr. Werken erst durch Einführung der Elektroschweißung möglich geworden ist, Maschinen herzustellen, die allen Beanspruchungen standhalten, während bei den Nietkonstruktionen trotz höheren Gewichts stets wichtige Verbindungen locker wurden und rissen. Aus vielen anderen dem Verfasser bekannt gewordenen Erfahrungen sei ein Bericht erwähnt, der sich mit den Ergebnissen aus dem Gebiete des Flugzeugbaus beschäftigt [19]). Darin heißt es wörtlich: „Die Motoren im Flugzeugbau werden fast ausschließlich auf geschweißten Stahlrohrböcken gelagert; genietete oder verschraubte Verbindungen sind ganz verschwunden, da sie den Erschütterungen gegenüber auf die Dauer nicht spielfrei bleiben. Hier zeigt sich, daß eine richtig durchgebildete und richtig bemessene Schweißstelle, bei der Nebenspannungen vermieden sind, gerade bei schwingender (Zug-Druck-Beanspruchung besondere Vorzüge aufweist, da sie eine vollständig homogene Verbindung darstellt.“ Endlich haben noch die bei Motorfundamenten und sonstigen schwingungsbeanspruchten Teilen auf Schiffen gemachten Beobachtungen [20]) [27]) die Feststellungen des Verfassers bestätigt. Auch hier hat sich gezeigt, daß eine richtig dimensionierte und geschweißte Konstruktion der Nietkonstruktion in bezug auf Gewicht, Kosten, Starrheit und Dauerfestigkeit überlegen ist.

Nachfolgend soll versucht werden, diese offensichtlichen Widersprüche aufzuklären. Da die bei Graf gefundenen Dauerfestigkeitswerte der Schweißverbindungen, die ähnlich Ab. 1 gestaltet waren, außerordentlich niedrig lagen [17a]), so war zu vermuten, daß die Gestalt der Probe eine wesentliche Ursache der geringen Dauerfestigkeit sein mußte. Der Verfasser ließ daher mehrere Proben nach den Maßen der Abb. 1 anfertigen, und zwar 3 geschweißte und 2 aus dem Vollen gearbeitete Stücke, die in einem Dauerschlagwerk geprüft wurden. Abb. 2 zeigt die Proben nach dem Bruch: Nr. 1 und 3 sind die aus einem Stück gearbeiteten, Nr. 2, 4 u. 5 die geschweißten. Außerdem wurde noch in den gleichen Querschnittsabmessungen, nur mit um den Nietdurchmesser verbreiterten Laschen, eine Probe genietet und geprüft (Abb. 2 Nr. 6). Die Proben wurden durch ein frei aus 170 mm Höhe herunterfallendes Bärgewicht von 340 kg auf Zug beansprucht. Die Zahlentafel 1 gibt an, wieviel Schläge bis zum Eintreten des Bruches der Proben erforderlich waren. Es ergab sich, daß die aus dem Vollen gearbeiteten Stücke sogar weniger Schläge ausgehalten hatten als die geschweißten, während sich die genietete Probe am günstigsten verhalten hatte. Nach 4342 Schlägen brach bei dieser die durch Schweißung hergestellte Querschnittsverdickung zum Einhängen der Probe in das Schlagwerk (Abb. 2 Nr. 6). Die beiden durch Laschen zusammengenieteten Flacheisen hatten sich infolge der Schläge um 3,8 mm auseinandergezogen.

Zahlentafel 1.

Dauerschlagversuche mit geschweißten und aus einem Stück gearbeiteten Proben in der Form Abb. 1; desgl. mit einer genieteten Probe.

Probe Nr.	Statische Zerreißfestigkeit des Werkstoffs in kg/mm²	Schlagzahl bis zum Bruch	Art der Herstellung
1	64	3454	aus einem Stück gearbeitet
2	64	4232	geschweißt
3	54	3134	aus einem Stück gearbeitet
4	56	3478	geschweißt
5	61	5328	geschweißt
6	51	4342	2 reihig genietet

Schlaggewicht 340 kg, Fallhöhe 170 mm, ca. 80 Schläge/Min.

Wie stark die scharfen Querschnittsübergänge bei solchen kleinen Proben das Versuchsergebnis beeinflussen, zeigen die Proben Nr. 1 und 3 (Abb. 2). Bei der ersten trat der Bruch im scharfen Querschnittsübergang vom Blech zur Lasche auf, während man bei der Probe Nr. 3, die eine stärkere Verformung zeigt, deutlich sehen kann, wie sich der Werkstoff an den mit A gekennzeichneten Stellen abgeschert hat. Der Werkstoff ist hier also besonders hoch beansprucht, so daß von einer gleichmäßigen Querschnittsbelastung der Laschen ebenso wie bei den Schweißverbindungen nicht gesprochen werden kann. An diesen Querschnittsübergängen treten die höchsten Spannungen auf. Unscheinbare Oberflächenverletzungen, die besonders bei

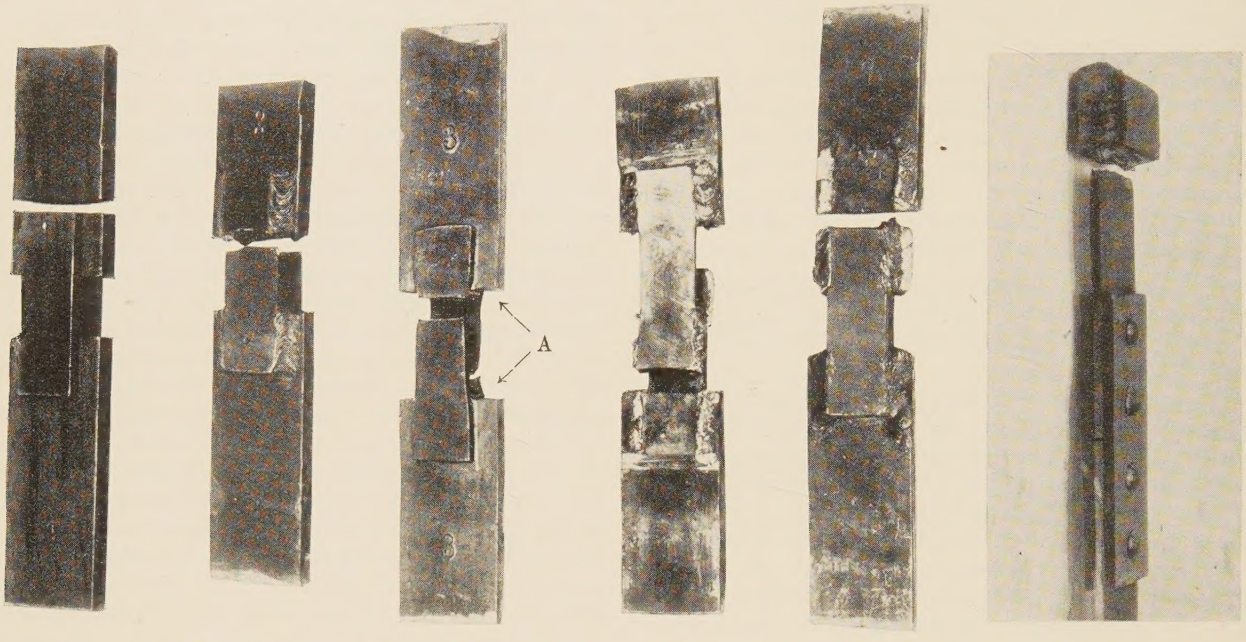


Abb. 2.

der Schweißung unvermeidlich sind, müssen deshalb hier zum Bruch führen. Für derartig gestaltete Konstruktionselemente hat die Nietverbindung entschieden günstigere Bedingungen, da der Laschenquerschnitt durch die in der Mitte sitzenden Nieten wegen Vermeidung der durch die Querkontraktion mit erhöhten Spannungen behafteten Randzone günstiger belastet wird und Kantenbeschädigungen nicht so leicht vorkommen. Es wurde aber bereits gesagt, daß bei ganzen Konstruktionen gerade umgekehrte Ergebnisse erzielt werden. Ebenso ändern sich bereits die Bedingungen zugunsten der Schweißung, wenn man die freie Laschenlänge zwischen den Flacheisen, an denen sie angeschweißt oder -genietet sind, bedeutend verlängert. Bei den Proben nach Abb. 1 beträgt die Laschenlänge 40 mm; schon bei 400 mm Länge werden höhere Schlagzahlen erreicht werden, weil die Schlagarbeit von der durch die größere Länge elastischeren Lasche besser verteilt aufgenommen wird.

G r a f hat auch Proben, die etwa nach Abb. 3 gestaltet waren, sowohl auf Dauer-Zug als auf Biegung untersucht. Die gefundenen Festigkeitswerte waren ebenfalls recht niedrig. Die Annahme schien also gerechtfertigt, daß der Stab durch die Einbrandzone stark geschwächt würde. Abb. 3 zeigt jedoch, daß, abgesehen von der starken Querschnittsveränderung, die Schweißspannungen die Hauptursache für die geringe Dauerfestigkeit sind. Die Verstärkungsbleche wurden bei der Probe in Abb. 3 auf den Stab gelegt und nur mit je einer Kehlnaht mit diesem verschweißt. Infolge der Schrumpfung der Schweiße beim Abkühlen hoben sich dann die Verstärkungsbleche, wie ersichtlich, ab. Wären die Bleche allseitig oder wenigstens an zwei Seiten festgeschweißt worden, so wäre ein Abheben nicht möglich gewesen, die Schweißspannungen wären in der Schweißverbindung verblieben und hätten diese vorbelastet, wodurch die meßbare Dauerfestigkeit noch mehr herabgesetzt worden wäre.

Auch die Dauerzugversuche mit Stäben, die in der Mitte mit einer Bohrung versehen waren (17 a, S. 10), hätten andere, wesentlich günstigere Ergebnisse gehabt, wenn man längere Stäbe gewählt und diese mit mehreren Bohrungen hintereinander in der Längsrich-

Abb. 3.

tung versehen hätte. Bei Dauerschlagversuchen hat ein Stab von doppelter Länge mit 4 Löchern gegenüber dem von G r a f verwendeten Stab (17 a, S. 10) 32%

mehr Schläge bis zum Bruch ausgehalten. Solche Bohrungen wirken wie Entlastungskerben und setzen die Kerbwirkung an den einzelnen Lochstellen herab [16]). Je länger der Stab ist, desto weniger wird die Formänderung auf einen hochbeanspruchten Querschnitt beschränkt.

4. Untersuchungen an größeren Konstruktionselementen und ganzen Konstruktionen.

Bei Nietverbindungen an ganzen Konstruktionen konzentriert sich die Formänderung hauptsächlich auf den Bereich der Nietlöcher; denn die Nietstellen bedeuten immer den schwächsten Teil der Konstruktion, weil sie nur durch Lochung, also Schwächung der anzuschließenden Querschnitte herzustellen sind. Mit der Zeit verlieren die Nieten ihre Schließkraft, und bald darauf kann man beobachten, wie sie oval ausschlagen und abgenutzt werden. Diese Erscheinungen kann man bei fast jedem Laufkran und auch bei Eisenbahngüterwagen feststellen. Eine richtig angeordnete Schweißverbindung jedoch verstärkt den angeschlossenen Querschnitt und versteift ihn zugleich derart, daß eine Verformung infolge Dauerbeanspruchung von diesen Stellen ferngehalten wird. Reißen oder Lockerwerden der Verbindungen kommt kaum vor, weil die angeschlossenen Teile der Konstruktion die Verformungsarbeit aufzunehmen imstande sind.

Solche Erfahrungstatsachen werden durch den folgenden vom Verfasser durchgeführten Versuch bestätigt: 2 Doppel-T-Träger, NP 14, von je 6 m Länge wurden an 2 je 1 m lange Stücke des gleichen Profils angeschweißt bzw. genietet, wobei die Verbindungen der Eigenheit der beiden Verfahren entsprechend bestmöglich ausgeführt wurden (Abb. 4). Die kurzen, 1 m langen Enden wurden dicht neben der Niet- bzw. Schweißverbindung starr eingespannt. Auf die beiden

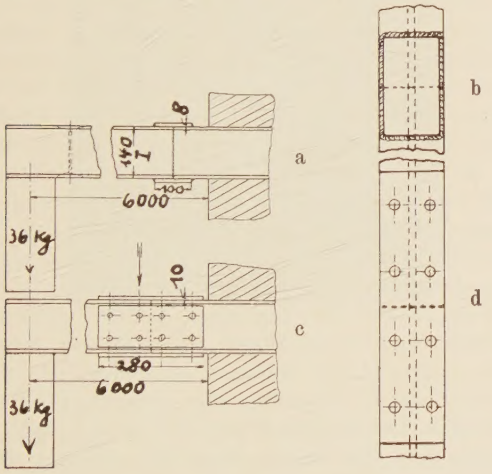


Abb. 4.

Flanschen des genieteten Doppel-T-Trägers wurde je eine 280 mm lange Lasche von 10 mm Wandstärke, außerdem auf jeder Seite des Steges eine gleiche Lasche aufgenietet (Abb. 4 c, d). Zur Verstärkung der Schweißnaht am geschweißten Träger wurde auf jeden der beiden Flanschen ein Blech von 8 mm Stärke und 100 mm Länge elektrisch aufgeschweißt (Abb. 4 a, b). Die zum Versuch vorbereiteten Träger zeigt Abb. 5. Jedes der beiden frei über 6 m in den Raum hinausragenden Trägerenden wurde mit je einem 36 kg-Gewicht belastet und in gleichmäßig starke Schwingungen versetzt. Dazu wurden die Enden der Träger durch ein Gestänge miteinander verbunden und dieses durch einen Kurbeltrieb unter Zwischenschaltung einer Zugfeder bewegt. Die Schwingungszahl wurde entsprechend der Eigenschwingungszahl der Träger gewählt. Um das zu erreichen, wurde der Antriebsmotor für den Kurbeltrieb so einreguliert, daß Synchronismus zwischen Umdrehungszahl des Kurbeltriebes und

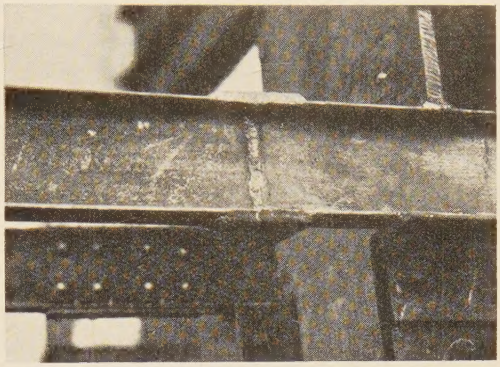


Abb. 5.

Schwingung der Träger bestand. Die Eigenschwingungszahl der Träger lag etwa bei 103 Schwingungen/Min. Die Ausschläge der Enden wurden so groß gewählt, daß die stärkste Beanspruchung an den Einspannstellen, nahe der Elastizitätsgrenze des Materials lag. Die Weite der Schwingungen, durch die die genannte Beanspruchung erreicht wurde, ergab sich wie folgt: Es wurde angenommen, daß die Träger nicht durch irgendeine Verbindung geschwächt wären, die Schweiß- oder Nietverbindung wurde also nicht berücksichtigt; denn es kam nur darauf an, wie sich die Verbindungselemente Schweißen und Nieten bei gleicher Beanspruchung genau gleicher Konstruktionen verhielten. Die maximale Spannung der Einspannstelle ergab sich:

a) infolge der Eigenlast zu

$$k_{b_1} = \frac{G \cdot L}{2\,W} = \frac{86{,}22 \cdot 600}{2 \cdot 81{,}9} = 316 \text{ kg/cm}^2$$

(G = das Gewicht des 6 m langen Trägers in kg; L = dessen Länge in cm; W = dessen Widerstandsmoment in cm³);

b) infolge des Zusatzgewichtes P von 36 kg am Ende des Trägers zu

$$k_{b_2} = \frac{P \cdot L}{W} = \frac{36 \cdot 600}{81{,}9} = 263 \text{ kg/cm}^2.$$

Folglich war

$$k_b = 316 + 263 = 579 \text{ kg/cm}^2.$$

Um eine Gesamtspannung von ca. 2100 kg/cm² zu erhalten, mußte die größte Biegungsspannung um:

$$k_b = 2100 - 579 = 1521 \text{ kg/cm}^2$$

vergrößert werden. Daraus ergibt sich über die vorhandene statische Durchbiegung hinaus eine zusätzliche dynamische Durchbiegung von:

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_b \cdot L^2}{E \cdot h} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1521 \cdot 600^2}{2\,100\,000 \cdot 14} = 12{,}4 \text{ cm}.$$

Der Träger wurde daher durch die Schwingungseinrichtung so bewegt, daß er aus der Ruhestellung her-

aus einen Ausschlag von 12,4 cm nach unten machte.

Nach etwa 1300 Schwingungen konnte man bereits ein Reiben der aufgenieteten Laschen und eine dadurch hervorgerufene, geringe Temperaturerhöhung an einigen Nieten feststellen. Mit der Zeit wurden immer mehr Nieten locker, bis schließlich der Träger bei 5203 Schwingungen am oberen Flansch beim ersten Niet vom Stoß aus einriß. Die Bruchstelle ist in Abb. 4 c durch einen Pfeil gekennzeichnet. Der Versuch mit

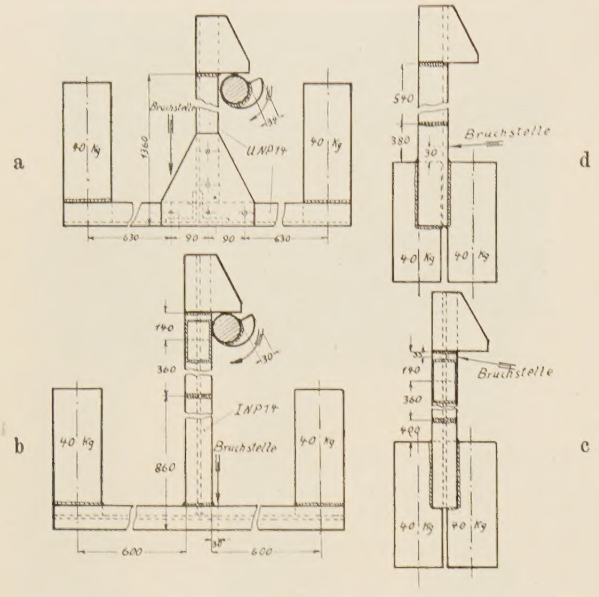


Abb. 6.

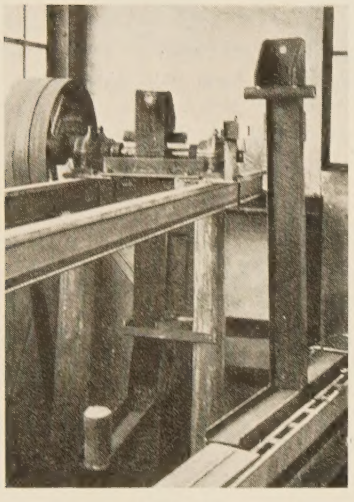


Abb. 7.

dem elektrisch geschweißten Träger wurde bis zu ca. 9500 Schwingungen weiter fortgeführt, wobei zum Schluß die Schwingungsweite auf etwa das Doppelte vergrößert wurde, um einen Bruch zu erzwingen. Da sich der Träger bereits zu stark verbogen hatte und seitlich ausknickte, mußte der Versuch dann abgebrochen werden.

An einigen kleineren, senkrecht hängend eingespannten Profilstäben wurde das Ergebnis des Versuches nachgeprüft; sie zeigten alle das gleiche Verhalten. Die Schweißungen haben auch ohne Verstärkungslaschen in allen Fällen gehalten, bei den Nietverbindungen dagegen trat immer der Bruch von einem Nietloch ausgehend ein.

Diese Versuche dürften die Behauptungen von Schächterle (17 f) widerlegen, wonach geschweißte Konstruktionen in Hinsicht auf Dauer- und Ermüdungsbruch schwerer ausfallen als genietete.

Bei diesen Versuchen wurden die Trägerteile nur Schwingungen unterworfen. Wesentlich größere Anforderungen werden an Konstruktionen gestellt, wenn zu den Schwingungen noch scharfe Schläge hinzukommen. Solche Beanspruchungen treten z. B. an vielen Kränen und Kranbahnen auf, wenn die ersten über ausgeschlagene Schienenstöße fahren.

Um das Verhalten der Konstruktionen bei diesen gefährlichsten Beanspruchungen zu beobachten, wurden Versuche an geschweißten und genieteten Verbindungen mittels eines Schlagwerkes vorgenommen. Das Schlagwerk bestand aus einer starken Transmissionswelle, die besonders gut gelagert und mit aufgeschweißten Nocken aus Stahlblech versehen war. Die nach Abb. 6 ausgeführten, geschweißten und genieteten Probeteile wurden bei etwa 200 Umdrehungen der Welle pro Minute durch die Nocken hochgehoben und fielen dann hart auf die Transmissionswelle auf; ein Zählwerk gab die Anzahl der Schläge an. Zuerst wurde die Konstruktion nach Abb. 6 a, dann die nach 6 b, 6 c und 6 d bis zum Bruch geprüft. Die Abbildungen 7—9 zeigen das Schlagwerk mit den verschiedenen Proben. In Abb. 7 sieht mann die im Schlagwerk eingehängte, genietete Probe nach Abb. 6 a, während daneben die Probe 6 b in geschweißter Ausführung aufgestellt ist. Für Probe 6 b wurde das Doppel-T-Profil NP 14 verwendet, das für den Schwingungsversuch nach Abb. 4 und Abb. 5, und zwar für den geschweißten Träger gebraucht worden war. In Abb. 6 b ist die elektrisch geschweißte Naht mit den beiden Verstärkungslaschen eingezeichnet; es ist die gleiche Stelle, die in Abb. 5 sichtbar ist. Außerdem wurde der Träger noch einmal in der Mitte durchgeschnitten und stumpf elektrisch ohne Anwendung von Laschen zusammengeschweißt. So sollte das Verhalten der gewöhnlichen, stumpf geschweißten Verbindungen bei Dauerbeanspruchungen ermittelt werden. Da die harten Schläge während des Versuches zu großen Lärm verursachten, fanden die weiteren Versuche im Freien statt (Abb. 8 u. 9). Bei Abb. 8 ist die Probe 6 b in der Schlagvorrichtung eingehängt, während Probe 6 a bereits gebrochen an der Seite steht. Probe 6 a hielt 50 406 Schläge aus, bis der waagerechte Träger an dem Nietloch einriß, das in Abb. 6 a durch einen Pfeil kenntlich gemacht ist. Schon nach etwa 15 000 Schwingungen konnte man hier ein Nachlassen der Schließkraft der Nieten feststellen. Laschen und Träger rieben aneinander; die dadurch hervorgerufene Erwärmung war deutlich fühlbar. Der waagerechte Träger der Probe 6 b brach nach 61 080 Schwingungen im vollen Material, 30 mm von der Schweißung entfernt. Nach dem Bruch der Probe 6 b wurde aus dieser Probe 6 c durch Abschneiden des gebrochenen, waagerechten Balkens hergestellt; unten an das senkrechte Doppel-T-Profil wurden zwei Gewichte angeschweißt. Dadurch sollten auch die Schweißverbindungen im senkrechten Träger, die bis jetzt allen Beanspruchungen standgehalten hatten, bis zum Bruch geprüft werden. Diese Probe hielt 55 314 weitere Schläge aus, ehe der Träger im vollen Material an der in Abb. 6 c bezeichneten Stelle durchriß.

Derselbe Versuch wurde mit einem Winkel 70 × 70 × 8 mm wiederholt (Abb. 6 d). Hier wurden 21 403 Schwingungen bis zum Bruch im vollen Material ge-

zählt. Abb. 9 zeigt das gebrochene Doppel-T-Profil und den Winkel nach Abb. 6 c und 6 d. Die Bruchstellen sind auf dieser Abb. deutlich zu erkennen. Die Höhe der dynamischen Beanspruchungen an den Bruch-

Abb. 8.

Abb. 9.

stellen ist nicht genau zu ermitteln; in Zahlentafel 2 wurden die Belastungswerte der Versuche annähernd angegeben. Das genügt im vorliegenden Falle aber auch, da es hier nur auf einen Vergleich der Beanspruchungen ankommt und vor allem darauf, ob der Bruch in den Schweiß- bzw. Nietverbindungen oder außerhalb dieser auftritt.

Bei Aufstellung der Zahlentafel 2 wurde zunächst die statische Durchbiegung des waagerechten Trägerstückes in der Schwerpunktsentfernung des Zusatzgewichtes von der Bruchstelle festgestellt:

1. infolge dieses Zusatzgewichtes nach der Formel

$$f_1 = \frac{P_1 \cdot L^3}{E \cdot J \cdot 3},$$

Zahlentafel 2.

Errechnung der Beanspruchungen nach den Versuchen 6 a bis 6 d.

	Versuch Nr.	a	b	c	d
1	G = Gewicht des Versuchskörpers bis zur Bruchstelle kg:	51,1	48,2	109	82
2	h = Fallhöhe cm:	3,4	3,0	3,0	3,7
3	$f_1 = \frac{P_1 \cdot L^3}{E \cdot J \cdot 3}$ statische Durchbiegung durch Gewicht $P_1 = 40$ kg cm:	0,0256	0,034		
4	$f_2 = \frac{P_2 \cdot L^3}{E \cdot J \cdot 8}$ statische Durchbiegung durch Eigengewicht des Trägers P_2 bis zur Bruchstelle cm:	0,00243	0,0026		
5	f = statische Durchbiegung $f_1 + f_2$ cm:	0,0280	0,0366		
6	Arbeitsinhalt unterhalb der Bruchstelle $\frac{P_3}{2} f_3 = G \cdot h$ cm/kg:	173,4	144,6	327	303,4
7	z = Schlagzahl bis zum Bruch	50 406	61 080	55 314	21 403
8	f_3 = dynamische Durchbiegung cm:	0,47	0,5		
9	f_4 = Gesamtdurchbiegung cm:	0,498	0,537		
10	k_b = maximale Biegungsbeanspruchung kg/mm²:	32,8	34		
11	spezifische Schlagarbeit cmkg/cm²:	20,8	19,2*)	17,9	20,2

*) Diese Probe hat bereits 9500 Schwingungen bei dem Versuch nach Abb. 4 u. 5 ausgehalten.

2. wegen der Eigenlast des Trägerstücks nach der Formel

$$f_2 = \frac{P_2 \cdot L^3}{E \cdot J \cdot 8}.$$

Durch Addition ergibt sich daraus die statische Gesamtdurchbiegung f. Bei dem freien Fall der Konstruktion aus der Höhe h wird in dem abgebrochenen Konstruktionsteil eine Arbeit $G \cdot h$ aufgespeichert, wobei unter G das Zusatzgewicht plus dem Eigengewicht des abgebrochenen Trägerstücks zu verstehen ist. Beim Aufschlagen der Konstruktion auf die Welle wird diese Arbeit frei und muß nun, abgesehen von dem in Wärme an der Schlagstelle umgewandelten, sehr kleinen Energieanteil, durch elastische Deformationen aufgenommen werden. Den weitaus größten Anteil an dieser elastischen Deformation hat das waagerechte Trägerstück aufzunehmen. Vernachlässigt man die anderen Kleinbeträge, so ergibt sich die Gleichung:

$$G \cdot h = \frac{P_3}{2} \cdot f_3,$$

wobei unter P_3 die Kraft verstanden wird, die erforderlich ist, um das waagerechte Stück des Trägers um f_3 cm herunterzubiegen, so daß $\frac{P_3}{2} \cdot f_3$ die durch die elastische Formänderung des Trägers geleistete Arbeit ist, die annähernd nach obiger Annahme gleich $G \cdot h$ gesetzt werden kann. In dieser Gleichung mit den zwei Unbekannten P_3 und f_3 kann man annähernd

$$f_3 = \frac{P_3 \cdot L^3}{E \cdot J \cdot 3}$$

setzen und daraus P_3 und f_3 errechnen. J ist das bei der Probe 6 a um die Nietlöcher verminderte Trägheitsmoment des U-Eisens, f_3 ist die dynamische Durchbiegung; aus dieser plus der vorher bereits ausgerechneten Durchbiegung f läßt sich jetzt die Maximalbeanspruchung k_b an der Bruchstelle ermitteln. Die direkte Messung der Durchbiegung f_3 wurde zwar versucht, es ließen sich jedoch keine brauchbaren Werte messen, da die Erschütterungen zu stark waren, und da infolge Ermüdung des Materials bleibende Formänderungen auftraten, so daß sich die waagerechten Trägerenden allmählich immer weiter durchbogen, bis der Bruch eintrat.

Die errechneten maximalen Biegungsbeanspruchungen in Spalte 10 auf Zahlentafel 2 sind sehr hoch.

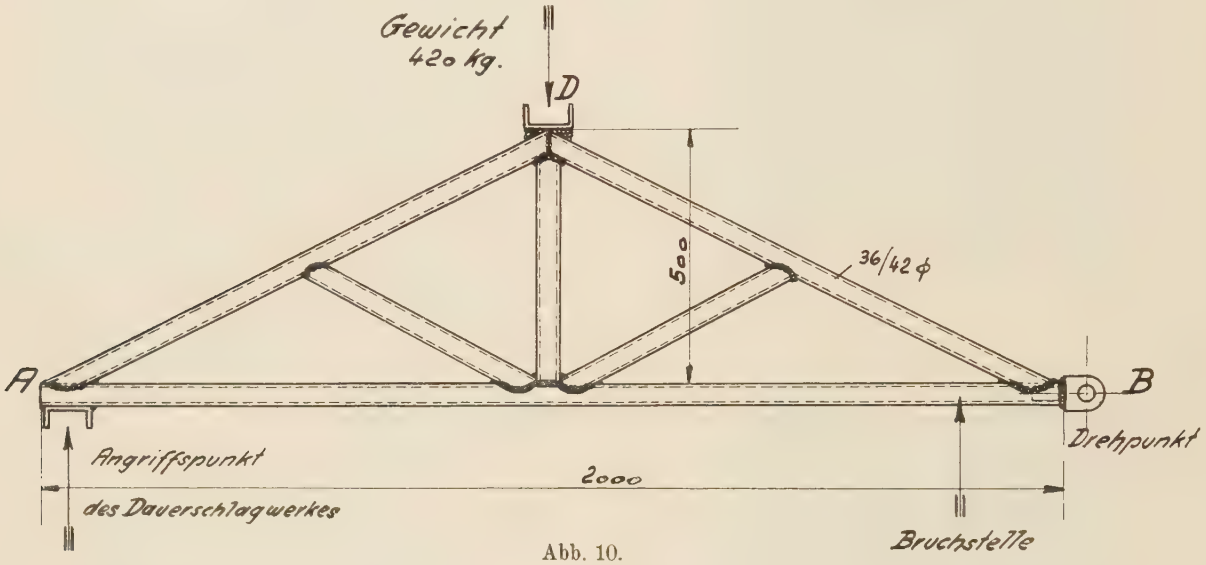


Abb. 10.

Aber sie sind absichtlich so gewählt worden, um schon nach einer verhältnismäßig geringen Anzahl von Schlägen den Bruch herbeizuführen. Dann sind auch die errechneten Spannungen in solchen Fällen meist höher als die tatsächlichen, weil das Material durch Verformung ausweicht und sich nicht mehr dem Hookeschen Gesetz entsprechend verhält [21]) [22]).

In Spalte 11 der Zahlentafel ist noch die spezifische Schlagarbeit für alle vier Versuche angegeben; diese Arbeit ist auf den kleinsten Querschnitt des senkrechten Trägerstücks bezogen. Aus dem Vergleich der Werte der spezifischen Schlagarbeit für die Versuche 6 a und 6 b kann man ersehen, daß diese Werte keine zuverlässigen Schlüsse erlauben, da die Hauptbeanspruchungen nicht an den senkrechten, sondern an den waagerechten Konstruktionsstücken auftreten. Es kommt auch viel darauf an, wie die Schlagarbeit von der betreffenden Konstruktion aufgenommen wird; z. B. sind die Konstruktionen 6 a und 6 b bedeutend elastischer als 6 c und 6 d und damit zur Aufnahme der Schlagarbeit befähigter. Daher sind für die senkrechten Trägerstücke die Beanspruchungen bei den Versuchsstücken 6 c und 6 d größer als bei 6 a und 6 b, obgleich die spezifischen Schlagarbeiten dem Rechnungsergebnis nach nicht viel voneinander abweichen.

Aus einer Reihe anderer Versuche sei hier noch einer angeführt, bei dem ein Fachwerkträger mit demselben Dauerschlagwerk geprüft wurde. Der Fachwerkträger war aus Gasrohr, 42/36 mm Durchmesser, geschweißt hergestellt. Den Träger sowie die Art der Beanspruchung durch das Dauerschlagwerk zeigt Abb. 10. Der Knotenpunkt B wurde drehbar gelagert und der Knotenpunkt A in das Gestänge des Dauerschlagwerkes eingehängt, während die Belastung der Konstruktion im Knotenpunkt D durch ein 420-kg-Gewicht erfolgte. Der Knotenpunkt A wurde durch das Schlagwerk um 30 mm etwa 200 mal in der Minute gehoben und fiel dann in das Gestänge hart auf. Nach 54 300 Schlägen trat der Bruch ein. Der Gitterträger nach dem Versuch ist in Abb. 11 gezeigt; in der Abb. ist auch noch das Belastungsgewicht ersichtlich. Dies bestand aus zwei Quadratblöcken, die durch ein Vierkantflacheisenstück verbunden waren. Alle Schweißstellen des Trägers blieben unverletzt. Die statische Zugspannung ihm Rohr $A\,B$ durch das 420-kg-Gewicht betrug nur $k_z = 2{,}28$ kg/mm².

Die maximale dynamische Beanspruchung läßt sich schwer ermitteln, da man nicht angeben kann, in welchem Maße die einzelnen Rohre des Gitterträgers an der Aufnahme der Formänderungsarbeit beteiligt waren.

Abb. 11.

Es muß noch betont werden, daß die Schweißungen für diese Versuche nicht etwa in der Hoffnung auf ein gutes Ergebnis besonders sorgfältig ausgeführt worden waren, die Schweißer, die daran arbeiteten, wußten gar

nicht, daß die Schweißverbindungen Versuchszwecken dienen sollten. Gearbeitet wurde mit normalen, blanken Elektroden guter Qualität. Die Ergebnisse sind also als richtige Betriebsergebnisse zu werten und nicht etwa als solche von „Paradeschweißungen".

Bei den zuletzt beschriebenen Versuchen ist der Bruch teilweise in einiger Entfernung von der Schweißstelle im gesunden Werkstoff eingetreten, wo Einflüsse durch die Schweißung nicht mehr vorhanden sein konnten. Zur Erklärung dieser Tatsache muß berücksichtigt werden, daß die Schweißung im Gegensatz zur Nietung den Verbindungsquerschnitt meist verstärkt. Dadurch und wegen der höheren Streckgrenze der Schweiße wird dieser Querschnitt an der Kontraktion gehindert. Wenn der Querschnittsübergang einigermaßen stetig ist, so daß Kerbwirkungen vermieden

Abb. 12.

werden, kann die Kontraktion und schließlich der Bruch sich erst in einiger Entfernung von der Schweißstelle ausbilden [20]). Damit erklären sich auch die verschiedenen Zerreißfestigkeitswerte, die L u d w i k und S c h e u [12]) bei verschieden gestalteten Proben des gleichen Materials gefunden haben.

Auch ein anderer Versuch bestätigt, daß die Schweißnaht infolge ihrer versteifenden Wirkung die Querkontraktion verhindern kann, so daß der Bruch in einiger Entfernung von der Schweißnaht auftritt: Zwei Bleche von je 34 bis 41 kg/mm² Festigkeit, 600 mm Breite, 700 mm Länge und 12 mm Stärke wurden stumpf durch elektrische Lichtbogenschweißung miteinander verbunden, in eine große Zerreißmaschine eingespannt und zerrissen (Abb. 12). In der Abb. sind deutlich die Fließfiguren ersichtlich, ebenso die Querkontraktion, die bei jedem der beiden Bleche etwa zwischen Einspannvorrichtung und Schweißnaht am stärksten ist. Bei einer dieser Stellen trat bei 43,3 kg/mm² der Bruch ein.

5. Wirkung von Eigenschwingungen.

Bei den bisher besprochenen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Dauerfestigkeitswerte, welche an Rundstäben, Rohren und einfachen Konstruktionselementen gefunden worden waren, nicht miteinander in Einklang zu bringen sind und daher um so weniger auf ganze Konstruktionen übertragen werden können.

Aber auch aus einem anderen Grunde können Laboratoriumsversuche der Praxis nur wenig nützen: Bei diesen Versuchen ist es meist nicht möglich, die vielfältigen Spannungszustände einer Stahlkonstruktion oder eines Maschinenteils, die durch wechselnde Belastungen hervorgerufen werden, rechnerisch zu erfassen. Denn zu den Beanspruchungen durch äußere Kräfte kommen noch die Belastungen durch Eigenschwingungen hinzu. Wenn es auch gelingt, kritische Eigenschwingungszahlen einer Konstruktion, eines Maschinenteils (z. B. einer Kurbelwelle) oder eines Maschinenfundaments zu errechnen, so kann man doch nicht die Höhe der durch die Schwingungen hervorgerufenen Werkstoffbeanspruchung ermitteln [23]).

Außerdem schwingt eine Konstruktion nicht nur mit der einen errechneten Schwingungszahl, sondern jeder einzelne Teil, bei Eisenkonstruktionen z. B. jeder Träger und jede Strebe, hat seine besonderen Eigenschwingungen, die wieder nach Art der Erregung und dem Grad der Einspannung und Versteifung verschieden sein können. Bei Blechplatten sei hier nur an die Kladnischen Klangfiguren erinnert, die nach Art und Ort der Erregung die mannigfachsten Formen annehmen. Ähnliche Erscheinungen treten an Stäben bei Stahlkonstruktionen auf. Man kann z. B. bei Kränen, wenn sie über einen schlechten Schienenstoß fahren, oder wenn sie sonstwie erschüttert werden, beobachten, wie plötzlich irgendeine Diagonale oder ein Träger anfängt zu schwirren. Die sowohl longitudinalen als auch transversalen Schwingungen der einzelnen Teile überlagern sich gegenseitig, verstärken sich oder heben sich auf. Sie sind bei Nietverbindungen besonders unangenehm, da sich die Nieten dabei lockern, wodurch die Schwingungen immer stärker werden. Darum haben sich, worauf hier wiederum hingewiesen werden muß, richtig hergestellte geschweißte Konstruktionen in dieser Hinsicht als der Nietkonstruktion überlegen erwiesen.

Messungen an einer Brücke haben z. B. bei Erregung mit einer Frequenz gleichzeitig 3 verschiedene Arten von Schwingungen ergeben [24]), und zwar: von 1 bis 20 Hertz, von 5 bis 100 Hertz und von 50 bis 500 Hertz. An anderen Stellen derselben Brücke würde man wahrscheinlich noch andere Arten von Schwingungen ermittelt haben. Bisher ist es noch nicht gelungen, die Beanspruchungen, die solche Schwingungen zur Folge haben können, zahlenmäßig festzulegen [25]) oder auch nur festzustellen, welche Art von Schwingungen die höchsten Spannungen hervorrufen. Welche Zerstörungen diese aber anrichten können und wie

machtlos man ihnen gegenübersteht, beweisen die folgenden Versuche:

Zur Ermittlung der Dauerschlagfestigkeit geschweißter Schienenstöße war ein Schlagwerk gebaut worden (Abb. 13), bei dem ein Hammer von etwa 240 kg Gewicht etwa 200 mm hochgehoben wurde und dann auf die Schienenstöße frei herabfiel. Der Hammerkopf war an einen Stiel angeschweißt, der aus einem Leichtprofilträger von 160 mm Höhe und 160 mm Breite bestand, und wurde durch eine Nockenwelle hochgehoben. Die statischen Biegungsbeanspruchungen, die durch

Abb. 13.

das Anheben im Stiel hervorgerufen wurden, waren fast Null. Nach etwa 800 000 Schlägen traten jedoch in dem Hammerstiel die in Abb. 14 oben eingezeichneten Risse auf; diese nahmen fast alle ihren Ausgang im Steg und gingen dann in die Flanschen über. Wie Abb. 14 unten zeigt, wurden nun auf den Stiel Verstärkungsbleche aufgeschweißt. Nach etwa 500 000 weiteren Schlägen riß der Stiel dann an den dort (Abb. 14 unten) eingezeichneten Stellen ein. (Die Zahlen in der Abb. geben die Reihenfolge an, in der die einzelnen Risse auftraten.) Keiner dieser Risse kann durch die üblichen Festigkeitsrechnungen erklärt werden; es handelt sich um Prellschwingungen von besonders hoher Frequenz. Eine niedrige Schwingungs- oder Schlagfestigkeit der Schweißnähte kommt als Erklärung nicht in Frage; denn der größte Teil der Risse trat an Stellen auf, die von Schweißwirkungen frei waren.

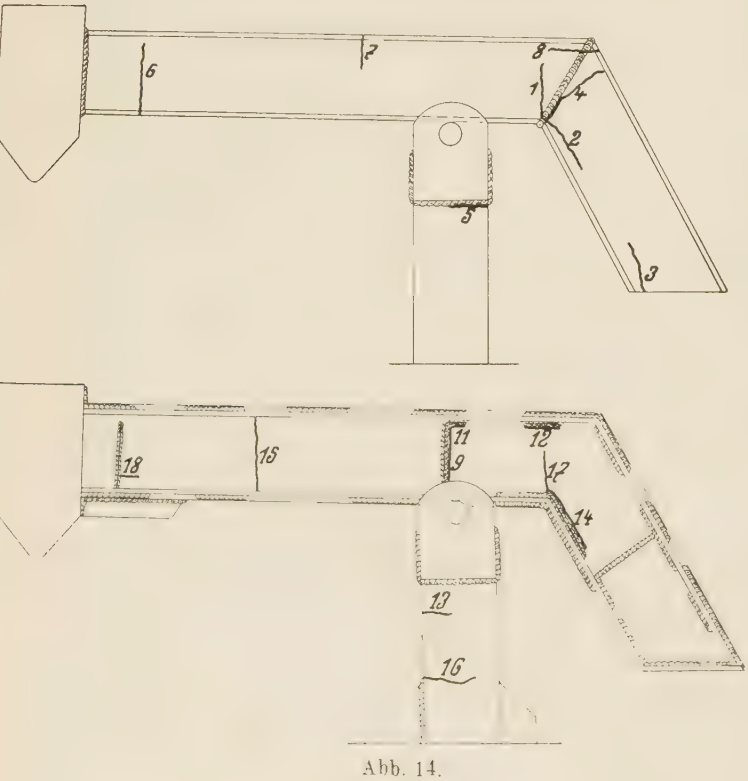


Abb. 14.

Konstruktive Gestaltung von Schweißverbindungen.

Wenn Schweißung und Nietung so wirtschaftlich als möglich angewendet werden sollen, dann kann man sich nicht bei beiden Verfahren der gleichen Konstruktionselemente bedienen, weil Schweißen und Nieten in ihrer Wesenheit zu verschieden voneinander sind. Die Nietverbindung braucht Profile mit ebenen Flächen und möglichst gleichen Wandstärken; diese werden mittels Laschen oder Überlappung, unter Schwächung des anzuschließenden Querschnitts infolge Bohrung der Nietlöcher zusammengenietet. Dagegen gestattet die Schweißung die direkte und homogene Verbindung beliebig gestalteter Querschnitte ohne deren Schwächung; die übertragenen Kräfte brauchen nicht wie bei der Nietung ihre Richtung zu ändern.

In den letzten Jahren ist die Güte der Schweißverbindungen und der Schweißverfahren so gesteigert worden, daß sie allen Anforderungen, die man billigerweise an sie stellen kann, genügen. Die Werkstoffe für Elektroden wurden wesentlich verbessert und Schweißstabumhüllungen gefunden, mit denen es möglich ist, sehr saubere, dichte, feste und zähe Schweißungen herzustellen, vorausgesetzt, daß der Konstrukteur alle Schwierigkeiten, die die Schweißarbeit gefährden können, kennt und vermeidet.

1. Verhütung von Schweißspannungen und Schrumpfungen.

Der Einfluß der beim Schweißen auftretenden Verformungen und Spannungen und die Mittel, diese in erträglichen Grenzen zu halten, sind im allgemeinen noch zu wenig bekannt. Und doch ist die Kenntnis dieser Mittel so wichtig, daß sie als wesentliche Voraussetzung für das Gelingen einer Schweißaufgabe anzusehen ist. In den bisher bekannten Anweisungen und Vorschlägen hierzu [26]) ist lediglich angegeben, daß eine Anhäufung von Schweißnähten an einer Stelle zu vermeiden ist, daß die Schweißstellen für den Schweißer gut zugänglich sein sollen, und daß die Konstruktionen so auszubilden sind, daß Überkopfschweißungen nicht erforderlich werden.

In der Praxis sind viel weiter ins einzelne gehende Maßnahmen schweißtechnischer und konstruktiver Art zu beachten, um wirklich die nachteiligen Einwirkungen der Verformungen und Spannungen zu verhüten. Hierher gehört vor allem die Anwendung von sogenannten unterbrochenen Schweißnähten an Stelle der durchgehenden, wenn Verbindungen von großer Länge herzustellen sind, z. B. aus Blechen zusammengeschweißte Träger. Der gegen die unterbrochene Schweißnaht oft vorgebrachte Einwand, daß sich in den Unterbrechungen Rost bilde, hat sich als gegenstandslos erwiesen [27]) Außer dem Vorteil der verminderten Verformungen und Spannungen ergibt sich bei der Methode der unterbrochenen Schweißung noch der der geringeren Kosten. Das Verschweißen und Verstärken gebrochener Kranträger z. B. war wiederholt nur durch unterbrochene Schweißung möglich; durchgehende Schweißraupen platzten sehr oft schon beim Erkalten, besonders wenn größere Wanddicken zu verbinden waren. Es ist zwar festgestellt worden, daß unterbrochene Schweißnähte die Dauerfestigkeit herabsetzen; man braucht aber trotzdem auf die unterbrochene Schweißung nicht zu verzichten, da nur in seltenen

Fällen, und dann auch nur an wenigen Stellen eine ganz besonders hohe Schwingungsfestigkeit notwendig sein wird. Diese kann man außerdem leicht durch entsprechend stärkere Ausbildung der betreffenden Schweißungen erreichen.

Wieweit man mit der Einsparung von Schweißnähten gehen kann, und wie sich dadurch das Schrumpfmaß ändert, wurde durch folgenden Versuch ermittelt: Nach den in Abb. 15 angegebenen Abmessungen wurden zwei Doppel-T-Träger aus Blechen geschweißt, jeder Träger bestand aus 1 Stegblech und 2 Platten als Ober- und Untergurt. Der eine Träger wurde durchgehend geschweißt, der andere unterbrochen, wie die Abb. zeigt. Im ganzen betrug die Länge der Schweißnähte bei dem zweiten Träger nur den vierten Teil derjenigen des ersten. An dem durchgehend geschweißten Träger wurde eine Schrumpfung von 4 mm bei 1500 mm Länge festgestellt, d. i. 1 : 375. Das Schrumpfmaß des unterbrochen geschweißten Trägers betrug dagegen bei gleicher Länge nur 0,8 mm oder 1 : 1875. Die beiden Versuchsträger waren so bemessen, daß sie in einer vorhandenen Biegemaschine bis zum Bruch belastet werden konten (Abb. 16). Wie aus der Abb. hervorgeht, wurden die Träger als Balken auf 2 Stützen in der Mitte durch eine Einzelkraft belastet; die Auflageentfernung betrug 1200 mm, die Auflager selbst waren Rollen, so daß sich die Träger bei der Durchbiegung auf den Auflagern frei verschieben konnten.

Der durchgehend geschweißte Träger nahm eine Belastung von 37,1 t bei 15 mm Durchbiegung auf, dann riß am Untergurt eine Schweißraupe ein, die auf der gezogenen Seite die beiden Gurtplatten zusammengehalten hatte. Darauf knickte der Träger seitlich aus; er wurde noch bis 30 mm weiter durchgebogen. Der unterbrochen geschweißte Träger nahm bei 21 mm Durchbiegung einen Druck von 36,2 t auf und knickte dann auch seitwärts aus; er wurde bis 42 mm weiter durchgebogen, ohne daß eine Schweißstelle einriß. Abb. 17 zeigt die beiden Träger nach den Versuchen. Bemerkenswert ist die geringere Durchbiegung bei dem durchgehend geschweißten Träger, trotz der etwa gleichen Belastung. Bei den verhältnismäßig kleinen Abmessungen der Versuchsträger haben die Querschnitte der Schweißraupen auf das Widerstandsmoment erhöhend gewirkt. Unter Berücksichtigung der Schweißraupenquerschnitte hatte der durchdurchgehend geschweißte Träger ein Widerstandsmoment von $W = 346$ cm³. Bei einer maximalen Druckkraft von 37,1 t ergibt das eine größte Zugspannung von

$$\frac{37\,100 \cdot 120}{4 \cdot 346} = 3220 \text{ kg/cm}^2.$$

Bei dem unterbrochen geschweißten Träger ergab sich bei einem Widerstandsmoment von $W = 329$ cm³ eine größte Zugspannung von

$$\frac{36\,200 \cdot 120}{4 \cdot 329} = 3300 \text{ kg/cm}^2.$$

Im allgemeinen pflegt man jedoch den lichten Abstand der einzelnen Schweißraupen wesentlich kleiner zu wählen als bei dem vorstehenden Versuch; man rechnet hierfür das 6—10 fache der Blechdicke des dünnsten Teils [26]), um besonders bei Druckkräften ein seitliches Ausknicken des Steges mit Sicherheit zu vermeiden.

Daß aber diese Gefahr nicht sehr groß ist, zeigt der unterbrochen geschweißte Versuchsträger, bei dem trotz starker Verformung, und obgleich er im ganzen seitlich ausknickte, an keiner Stelle beobachtet werden

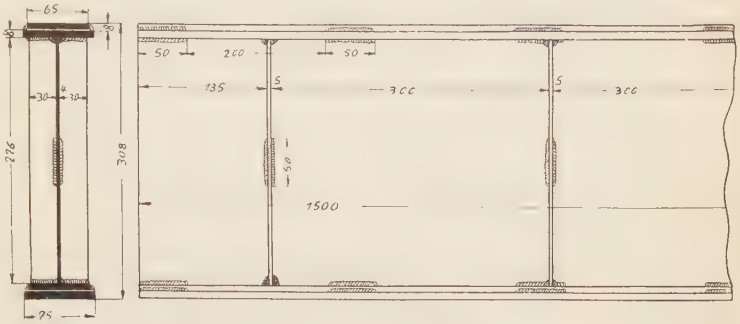


Abb. 15.

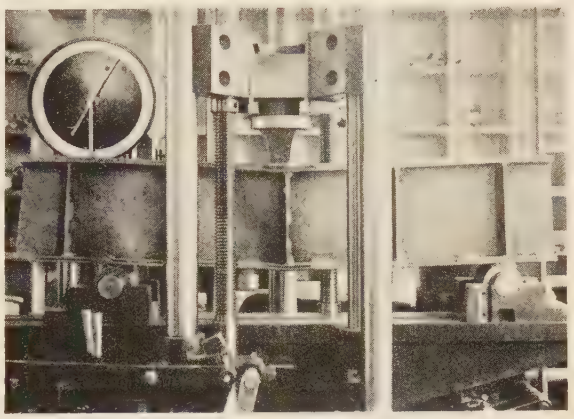


Abb. 16.

Abb. 17.

konnte, daß das Stegblech im Winkel zu den Gurten weiter ausgeknickt wäre.

Aus diesem Grunde hatte der Verfasser auch keine Bedenken, bei dem in Abb. 18 gezeigten, nach seinen

Angaben geschweißten 20-t-Laufkran ebenfalls größere Abstände der Schweißraupen zu wählen, als es die Vorschriften verlangen. Der Erfolg bestand in Kostenersparnis und Verringerung der Schrumpfspannungen. Bei einer Spannweite von 12 400 mm wurde eine Schrumpfung von 5 mm, d. i. 1 : 2480, gemessen.

Bei der Schlachthofbrücke in Dresden [28]), bei der an den Blechträgern alle Schweißnähte durchgehend geschweißt wurden, hat man dagegen eine Längsschrumpfung von 1 : 1000 festgestellt, obgleich hier das Verhältnis von Schweißraupenquerschnitt zum Trägerquerschnitt wesentlich kleiner ist.

Die untere Reihe der Bleche in Abb. 20 wurde ohne Unterbrechung schnell durchgeschweißt, d. h. es wurde bei der starken Kehlnaht eine Schweißraupe ohne zeitliche Unterbrechung auf die andere aufgetragen, bis die angegebene Stärke erreicht war, und erst dann zum nächsten Stück übergegangen. Die Schweißung der oberen Reihe dagegen wurde abwechselnd ausgeführt: eine Lage bei Probe 1, eine Lage bei Probe 2 usw. bis zu Probe 4, dann wieder von vorn begonnen. Übrigens war die Schweißleistung trotz dieser Unterbrechungen gleich, d. h. die Proben wurden alle in der gleichen Zeit fertig. Bei der autogenen Schweißung mußte der

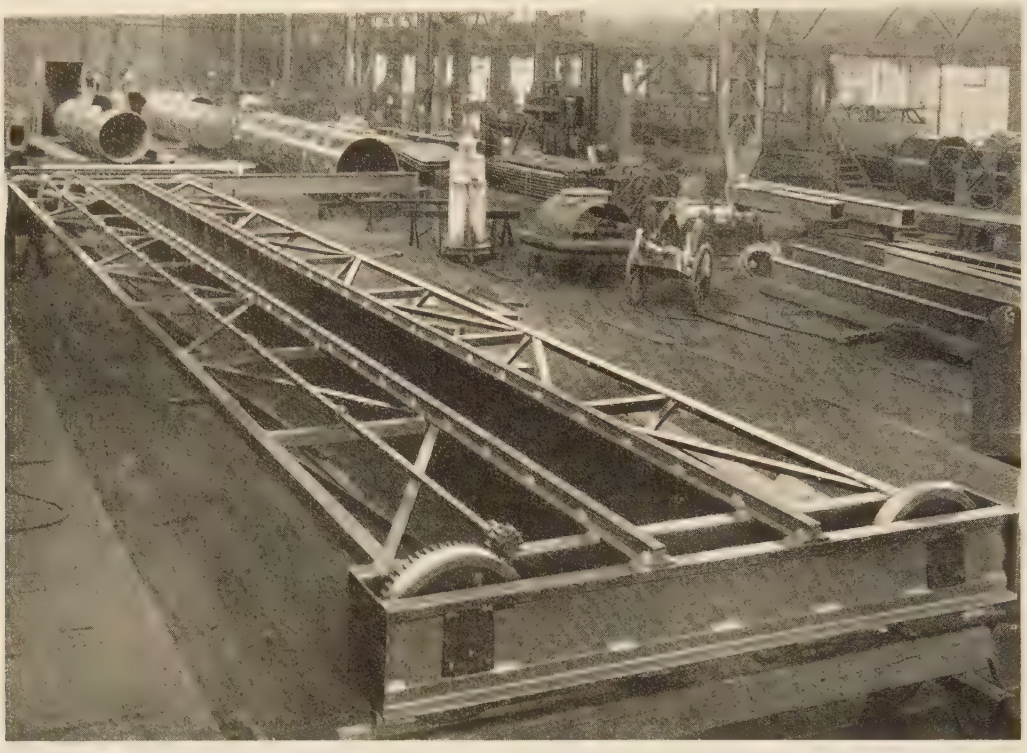


Abb. 18.

Daß die ermittelten Schrumpfmaße bei den Versuchs-Blechträgern so verschieden waren, ist verständlich; denn die Schrumpfung muß um so größer sein, je mehr Schweißquerschnitt zum Trägerquerschnitt hinzukommt. Durch die unterbrochene Schweißung wird das durchschnittliche Verhältnis von Schweißquerschnitt zu Trägerquerschnitt herabgesetzt, was die Schrumpfung wesentlich verringert [29]).

Von sehr wesentlichem Einfluß auf das Schrumpfmaß ist auch die Art der Wärmezufuhr beim Schweißen. Je mehr Wärme dem Werkstück in der Zeiteinheit an einer Stelle zugeführt wird, um so größer ist die Schrumpfung infolge der starken Erwärmung des Werkstückes selbst. Es ist also direkt falsch, wenn vielfach vorgeschlagen wird, daß zur Vermeidung von Verwerfungen an einem Profil 2 Schweißer angesetzt werden sollen, die symmetrisch zum Träger und gleichzeitig schweißen [30]). Folgende einfache Versuche beweisen, daß man durch zeitlich unterteiltes Schweißen nachteilige Verformungen fast völlig vermeiden kann: Mehrere Blechstreifen von etwa 8 mm Stärke wurden senkrecht aufeinandergesetzt und durch Kehlschweißungen miteinander verbunden (Abb. 19 u. 20). Die eine Kehlnaht wurde etwa $a = 25$ mm, die andere nur $a' = 5$ mm stark hergestellt. Die Schweißung wurde bei Abb. 19 autogen, bei Abb. 20 elektrisch ausgeführt. Eigenart dieses Verfahrens entsprechend ein verhältnismäßig großer Teil des umgebenden Werkstoffs auf Rotglut gebracht werden, daher war die Verformung bei diesen Proben, wie aus der Abbildung ersichtlich,

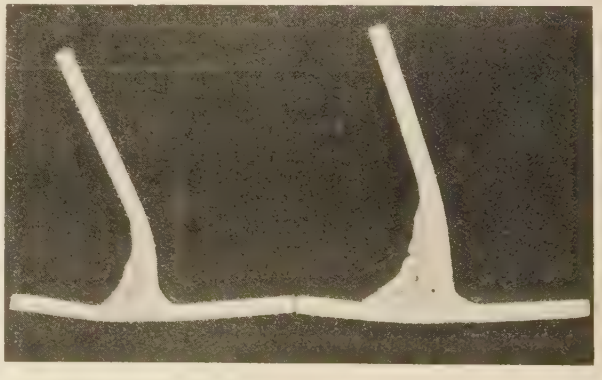


Abb. 19.

besonders groß. Bei den elektrisch geschweißten Proben der unteren Reihe in Abb. 20 ist die Verformung schon bedeutend geringer, während sie bei der unterbrochen durchgeführten Schweißung der oberen Reihe fast ganz vermieden werden konnte.

Diese Ergebnisse dürften eindeutig beweisen, daß es als Fehlschluß bezeichnet werden muß, wenn versucht wird, eine Beziehung von Blechdicke zu Blechverformung beim Schweißen von Trägern abzuleiten [28]).

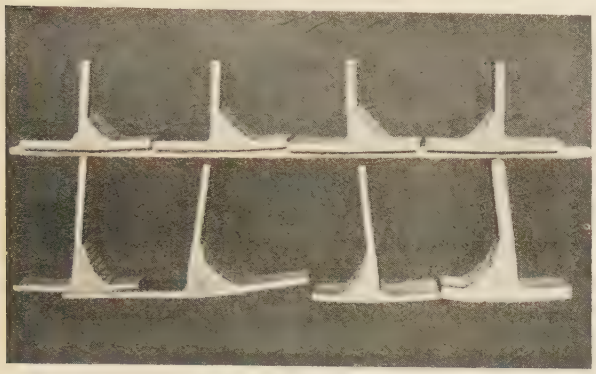


Abb. 20.

Abb. 21.

Abb. 22.

In Abb. 4 der Arbeit von Reinhold und Heller streuen die Meßwerte so stark, daß die eingezeichnete Kurve eine sehr vage Annahme genannt werden muß; durch kleine Änderungen in der Ausführung der Schweißung könnte sie einen beliebig anderen Verlauf nehmen.

Daß sich die Verformung und Schrumpfung durch die angegebene Art der zeitlich und örtlich unterteilten Schweißung erheblich verringert, hat sich praktisch im großen erwiesen, als das Hüttenwerk, dem der Verfasser angehört, für einen Kirchenbau in Osnabrück-Schinkel die Stahlkonstruktion herstellte [36]) (Abb. 21, 22). Für die Konstruktion wurde eine größere Anzahl von Säulen aus Blechen zusammengeschweißt; die Säulenstege bestehen aus Blechen 430 × 8 mm², die Flanschen haben einen Querschnitt von je 250 × 12 mm² und sind mit den Stegen durch unterbrochene Kehlnähte von etwa 5 mm Dicke verbunden. Die Schweißnähte sind 60 mm lang und durch 100 mm Zwischenraum unterbrochen. Verfasser ließ die 18 m langen Säulen zunächst in größeren Abständen zusammenheften und dann auf jede Seite 2 der in Abb. 22 sichtbaren Blechscheiben schieben und mit Holzkeilen befestigen. Dadurch war es möglich, die langen Säulen ohne Zeitverlust und ohne Kran in jede beliebige Stellung zu drehen; denn durch die Scheiben blieb der Schwerpunkt der Säulen immer in gleicher Höhe. Feste Einspannvorrichtungen wurden also vermieden; ein Verziehen können diese ohnehin nicht verhindern. Die Schweißung wurde vielmehr so durchgeführt, daß eine Neigung zum Verziehen gar nicht aufkommen konnte. Um dies zu erreichen, wurde an allen vier Kehlnähten abwechselnd geschweißt; die kurzen, 60 mm langen Schweißnahte wurden an derselben Kehlnaht in mindestens 1 m Entfernung voneinander gezogen, dann zur nächsten Kehlnaht gewendet und hier ebenso verfahren usw., bis zur Fertigstellung der ganzen Schweißung. Der Erfolg war, daß sich nicht eine Säule verzogen hatte, und daß die 18 m langen Säulen durchschnittlich nur um 4,3 mm geschrumpft waren, was einem Schrumpfmaß von 1 : 4180 entspricht.

Abb. 23.

Aus einem Vergleich dieser Schrumpfwerte mit den oben angegebenen geht noch deutlicher hervor, daß diese Arbeitsweise die richtige ist, besonders wenn man bedenkt, daß bei diesem Beispiel das Verhältnis von Schweißquerschnitt zu Trägerquerschnitt noch größer ist als z. B. bei der Schlachthofbrücke [28]).

Hieraus geht hervor, daß die Angaben von Lottmann [29]) und Burkhardt [27]), wonach die Querschrumpfung bei gleichen Formen der Schweißquerschnitte etwa gleiche Werte hat, nur unter Zugrundelegung der gleichen Schweißweise zutreffen können.

Da es für die einwandfreie Lösung von Schweißaufgaben wertvoll schien, auf die Querschrumpfung noch näher einzugehen und die Einflüsse zu ermitteln, durch die sie bestimmt wird, wurde folgender Versuch vorgenommen: Auf einen Flachstahl aus St 37, 14 × 80 mm² Querschnitt und 1000 mm Länge, wurden mehrere Schweißraupen senkrecht zur Längsrichtung

aufgeschweißt (Abb. 23). Das Flacheisen wurde so eingespannt, daß es auch während des Schweißens mit konstanter Zugspannung belastet werden konnte. Außerdem wurde eine Meßuhr angebracht, mit deren Hilfe alle Längsänderungen während des Versuchs festgestellt werden konnten (Abb. 24). Es wurden vier Versuche durchgeführt und jedesmal 2 Raupen auf jeder Seite des Flachstahls aufgeschweißt. Dies wurde einmal mit 1000 kg/cm², zweimal mit 600 kg/cm² und einmal mit 100 kg/cm² während des ganzen Versuches auf Zug belastet. Die Kurven in Abb. 24 geben die Längenänderungen in Abhängigkeit von der Zeit an, und zwar wurde in den Zeiten von 0 bis A, von B bis C, von D bis E und von F bis G geschweißt, was in einer Verlängerung des Flachstahls während dieser Zeit infolge der Wärmezufuhr zum Ausdruck kam. In der Zwischenzeit kühlte der Stab ab und zog sich zusammen. Bemerkenswert ist bei dem Versuch mit 0,235 mm gegenüber 0,945 mm beim ersten Versuch mit der gleichen Belastung übrigblieb.

Die oben geschilderten Versuche mit konstanter Einspannung wurden noch durch solche mit fester Einspannung ergänzt. In einen starren Rahmen wurden 2 Flachstäbe von je 8×60 mm² Querschnitt und 2000 mm Länge aus St 37 unter Vorspannung eingeschweißt. Am einen Ende der Stäbe, nahe der Einspannstelle, wurden 2 akustische Dehnungsmesser von Maihak, Hamburg, angebracht und am anderen Ende beginnend, auf jeder Seite je eine 1 m lange Schweißnaht aufgetragen (Abb. 25). Es wurden zwei Versuche dieser Art durchgeführt. Bei dem ersten wurden die Schweißraupen auf jeder Seite hintereinander möglichst ohne Unterbrechungen aufgetragen, während bei dem zweiten Versuch die durchgehenden Schweißnähte mit zeitlichen und örtlichen Unterbrechungen niedergeschmolzen wurden. Bei diesen Arbeiten wurde dar-

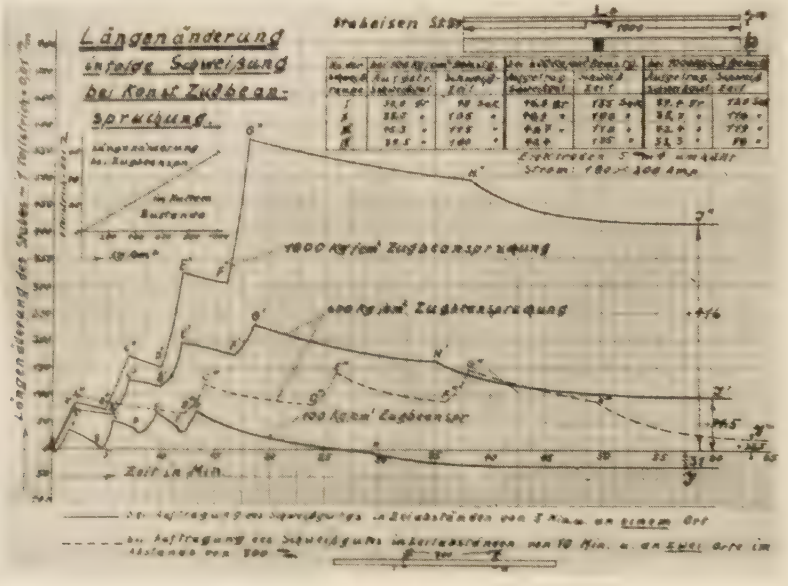


Abb. 24.

1000 kg cm² Zugbelastung die mit jeder neuen Schweißraupe ständig steigende Verlängerung des Stabes. Bei den stark ausgezogenen Kurven wurden die Schweißraupen dicht nebeneinander in Zeitabständen von etwa 3 Minuten gezogen. Dadurch wurde der Werkstoff an dieser Stelle allmählich so stark erwärmt, daß der Fließpunkt für die gewählte Belastung zum Teil überschritten wurde, was besonders deutlich an der Kurve mit 1000 kg cm² festgestellt werden kann. Von G bis H erfolgte die Abkühlung an der Luft, von H bis J wurde, um den Versuch rascher zu Ende zu führen, mit Wasser nachgeholfen. Bei J war die Ausgangstemperatur wieder erreicht. Die 3 stark ausgezogenen Kurven zeigen, daß bei den Versuchen mit 1000 kg cm² und 600 kg cm² eine bleibende Verlängerung von 4,16 mm und 0,945 mm und bei dem Versuch mit 100 kg cm² eine bleibende Verkürzung von 0,31 mm entstanden war. Bei dem Versuch mit 600 kg cm² Belastung (gestrichelte Kurve) waren die 4 Schweißraupen in Zeitabständen von etwa 10 Minuten und in örtlichen Abständen von 300 mm voneinander aufgebracht worden. Dadurch wurde der Flachstab nicht so stark erwärmt als bei den ersten Versuchen, er konnte sich in der Zwischenzeit wieder teilweise zusammenziehen, so daß am Ende des Versuchs eine bleibende Verlängerung von nur

auf geachtet, daß in beiden Fällen der Schweißdraht, Drahtdurchmesser, Stromstärke und aufgetragenes Elektrodengewicht gleich waren. Beobachtet wurden die Spannungsänderungen und die Schweißzeit.

Das Ergebnis der Versuche ist im Diagramm Abb. 26 dargestellt, welches die Spannungsänderungen in Abhängigkeit von der Zeit angibt. Die durchgezogene Kurve entspricht der Spannungsänderung bei durchgehender Schweißung. Der vom Nullpunkt nach unten gehende Arm zeigt die Verringerung der Vorspannung durch die durchgehende Schweißnaht auf der einen Seite. Die nächste aufwärts gehende Strecke entspricht der Schrumpfung während des Drehens, dem ein zweites Abfallen während des Schweißens auf der anderen Seite folgt. Nach Beendigung der Schweißung setzt die Schrumpfung ein, die über die ursprüngliche Vorspannung hinausgeht, so daß nach vollkommener Abkühlung gegenüber dem Ausgangszustand eine Spannungssteigerung von etwa 12,2 kg mm² eingetreten ist.

Bei dem zweiten Versuch, dessen Spannungsverlauf in der strichpunktierten Kurve dargestellt ist, wurde mit zeitlichen und örtlichen Unterbrechungen geschweißt, was sich in der Zickzacklinie ausdrückt. Nach Beendigung der Schweißung und vollständiger

Abkühlung trat bei diesem Versuch nur eine Spannungssteigerung von 4,6 kg/mm² ein, also nur etwa der dritte Teil des oberen Wertes. Allerdings ist die Zeit, in der die zweite Schweißung ausgeführt wurde, etwa die doppelte der ersten. Um auch von der Schweißleistung die richtige Vorstellung zu haben, muß man daher bedenken, daß in der praktischen Arbeit der Schweißer entweder abwechselnd an zwei Stellen beschäftigt wird, oder daß er eigentlich die doppelte Nahtlänge als bei dem Versuch hätte in Arbeit nehmen können.

Diese Ergebnisse führen zu verschiedenen Schlußfolgerungen; sie sind besonders für Verstärkungsschweißungen an genieteten Stahlbauwerken von Bedeutung. Zunächst muß festgestellt werden, daß es unmöglich ist, eine Formel aufzustellen, nach der die bleibenden Verkürzungen oder Verlängerungen berechnet werden könnten. Die Schweißungen werden jeweils unter so verschiedenen Bedingungen ausgeführt, daß die Ergebnisse jedesmal anders sein müssen; der Durchmesser des Schweißdrahtes, die Schweißstromstärke, die Lage der Schweißraupen, ihre zeitliche und örtliche Aufeinanderfolge, der Querschnitt des Verstärkungsbleches, Witterungs- und Temperaturverhältnisse und die Art der Einspannung, all diese Faktoren tragen zur Bestimmung des Schweißergebnisses bei. Dies ist auch bei Bewertung der in der Literatur mitgeteilten Versuche zu berücksichtigen [27] [28] [29].

Will man z. B. die infolge ihrer Eigenlast vorbelasteten Träger einer Brücke durch Aufschweißen von Blechen verstärken, so genügt es u. U., die Verstärkungsbleche ohne Vorspannung anzuheften und dann festzuschweißen. Je nach dem Umfang der hergestellten Schweißung und der Art der oben genannten Faktoren wird das Verstärkungsblech so stark schrumpfen, daß es nach Erkalten die gewünschte Vorspannung hat. Um sie wirklich zu erreichen, kann man so vorgehen, daß man an einigen Stellen des Verstärkungsbleches Dehnungsmesser anbringt, die anzeigen, wann die nötige Vorspannung infolge Schrumpfung eingetreten ist. Voraussetzung für die einwandfreie Messung der Spannungen ist natürlich, daß die Schweißraupen auf die ganze Länge der Naht gleichmäßig örtlich und zeitlich verteilt hergestellt werden.

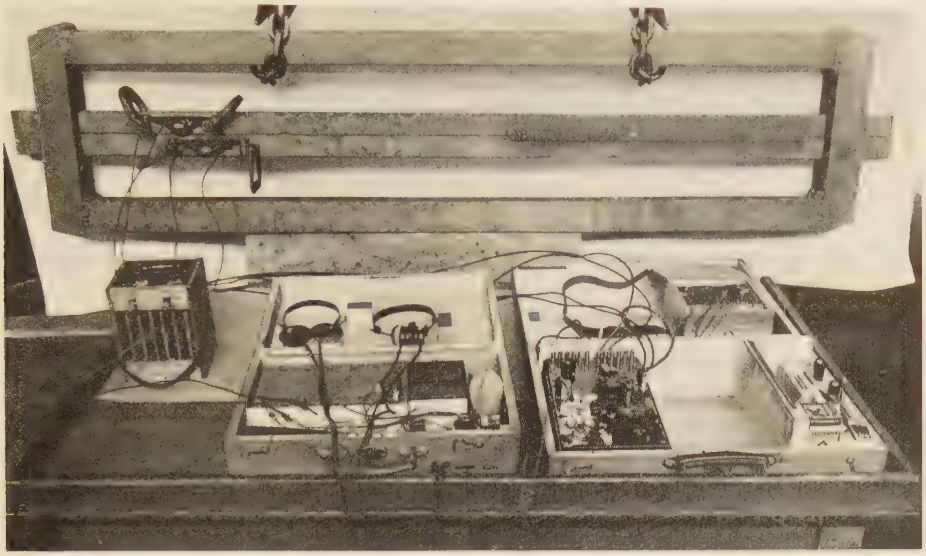


Abb. 25.

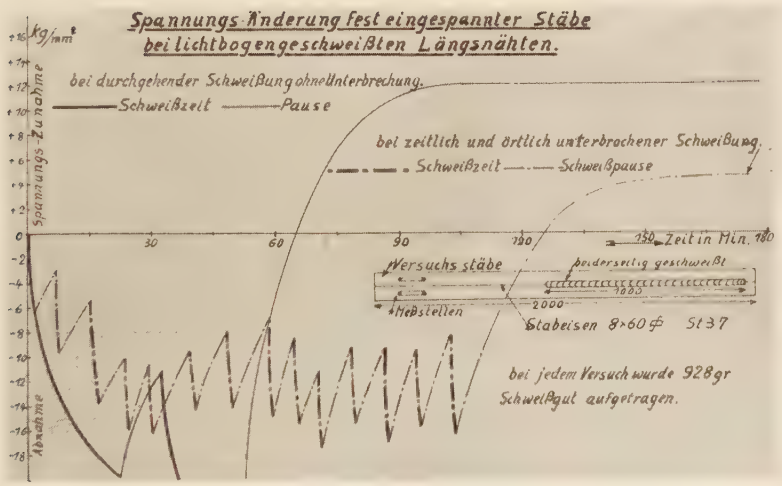


Abb. 26.

2. Anwendung der gewonnenen Erfahrungen auf die schweißgerechte Ausbildung von Stahlbauverbindungen.

Für die schweißtechnisch richtige Gestaltung von Verbindungen gilt als oberster Grundsatz, daß die Kräfte möglichst einfach und gradlinig übertragen werden sollen; d. h. es sind Biegungsmomente, bzw. Knicke in den Spannungslinien zu vermeiden. Dieser Forderung entspricht am meisten der einfache Stumpfstoß. Da man jedoch besonders bei der auf der Baustelle hergestellten Schweißverbindung nicht mit der gleichen durchschnittlichen Festigkeit von Schweiße und Grundwerkstoff rechnen kann, so müßten zur Ausnutzung des anzuschließenden Querschnitts die Schweißnähte entsprechend verstärkt werden. Zu dicke Schweißnähte haben aber unangenehme Spannungen zur Folge; man muß daher auf jeden Fall mit dünnen Schweißnähten auszukommen suchen, was sehr gut möglich ist, wenn man an Stelle des einfachen, senkrechten Stumpfstoßes den schrägen Stumpfstoß wählt. Diese Verbindungsart kommt vor allem für die Flanschen von Blechträgern in Frage.

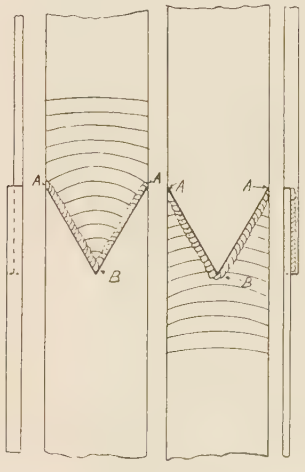


Abb. 27.

Bei verhältnismäßig breiten Flanschen sind die erforderlichen, langen Schweißnähte wegen der leicht auftretenden Spannungen nachteilig. Darum wendet man hier, sowie immer dann, wenn ungleich starke Flanschen miteinander zu verbinden sind, mit Vorteil den sogenannten Winkelstoß an (Abb. 27). Hierbei werden die Bleche oder Flacheisen etwa unter einem Winkel von 60 Grad zugespitzt bzw. ausgeschnitten, so daß jene ineinander passen, und die so erhaltenen Schweißkanten, welche insgesamt eine Länge von etwa der doppelten Blechbreite haben, miteinander verschweißt. Zum Schneiden der Bleche wird zweckmäßig der maschinell geführte Autogenschneidbrenner verwendet. Verschweißt man auf diese Weise gleiche Wandstärken, so ist die erzielte Verbindung äußerst zuverlässig und den mit Decklaschen verstärkten Stumpfstößen vorzuziehen. Bei ungleichen Wandstärken ergibt sich eine ungleiche Spannungsverteilung über den Querschnitt, die eine volle Ausnutzung der Festigkeit des schwächeren Anschlußstückes verhindert. In Abb. 27 sind die Verformungslinien bei Zugbelastung schwach eingetragen; sie zeigen, daß bei Zuspitzung des schwächeren Teils der gefährliche Querschnitt bei A—A liegt, da an diesen Punkten die größten Zugspannungen auftreten (linkes Bild). Bei mehreren Zerreißversuchen an Blechen aus St 52, die auf diese Weise geschweißt worden waren, trat der Bruch immer an der Stelle A—A bei einer Zugspannung zwischen 45,6 und 49,7 kg/mm² ein; diese Zugbelastung ist unter der Annahme gleichmäßiger Spannungsverteilung über den schwächeren Querschnitt errechnet. Abb. 28 links zeigt eine dieser Proben nach dem Bruch. Die Schweißnahtdicke an dem Versuchsstück betrug 80% der schwächeren Blechdicke. Wird der stärkere Teil zugespitzt, so liegt der gefährliche Querschnitt in der Höhe der Spitze B (Abb. 27 rechts). Bei entsprechenden Versuchen ist etwa bei der gleichen Belastung wie oben immer an dieser Stelle der Bruch eingetreten (Abb. 28 rechts). Solche ungleichen Belastungen des Winkelstoßes werden vermieden, wenn man den stärkeren Querschnitt durch Schmieden oder Hobeln bzw. Fräsen auf die Dicke des schwächeren mit allmählichem Übergang zur Schweißstelle abarbeitet. Die sonst vielfach vorgeschlagenen Stumpfstoßverbindungen [31]) [32]) sind teurer in der Herstellung und wegen ungleichmäßiger Spannungsverteilung weniger zuverlässig als die Verbindung nach dem eben beschriebenen Verfahren (vgl. auch 17 g).

T- oder U-Profile werden durch Schweißen unter Weglassung der Knotenbleche etwa an den Durchdringungslinien verbunden oder so ineinandergesteckt, daß sich Überlappungen ergeben, die durch Kehlnähte miteinander verschweißt werden. Sind Fachwerke aus gleich hohen Profilen, etwa wie in Abb. 29, herzustellen, so ist es vorteilhaft, über die Verbindungsnähte an den Flanschen Flachstäbe zu schweißen, wie in der Abbildung angegeben. Diese Flachstäbe können außen und innen oder nur innen angeordnet werden; sie schützen die Schweißnähte an den Flanschkanten vor dem Einreißen und erhöhen damit wesentlich die Sicherheit der gesamten Konstruktion.

Es ist üblich, Eckverbindungen durch hochkant eingeschweißte Blechwinkel, wie Abb. 30, zu verstärken. Diese Lösung ist jedoch nicht empfehlenswert; denn die Schweißwärme ruft in den Winkelblechen Schrumpfspannungen hervor; kommen hierzu noch Spannungen durch Betriebsbelastung, so kann leicht eine unzulässig hohe Spannungsanhäufung in dem schmalen Rücken des Winkelbleches auftreten [33]). Diese Nachteile werden durch die in Abb. 31 gezeigte Anordnung vermieden; denn hier werden die Verstärkungsbleche so angeordnet, daß die Schweißnähte in ihrer ganzen Länge gleichmäßig belastet werden und wesentlich größere Kräfte zu übertragen vermögen als bei der Anordnung nach Abb. 30. Derselbe Konstruktionsgedanke ist noch in anderer Ausführung in den Abb. 32, 33 gezeigt. Hier kann man durch allseitiges Verschweißen der Verstärkungsbleche schwer zugängliche Schmutzecken gut vermeiden. Das in Abb. 34 dargestellte, mittels eines Zuschlaghammers heruntergeschlagene Doppel-T-Profil läßt erkennen, daß die angegebene Konstruktionsweise nach allen Richtungen hin absolut zuverlässige Verbindungen ermöglicht. Zu bemerken ist bei diesem Versuch, daß der ausgeführte Schweißquerschnitt nur 80% des Doppel-T-Profilquerschnitts betrug.

Auch beim Schweißen von Blechträgern in Doppel-T- oder Kastenform sowie von Säulen- und Rahmenecken kann man diesen Konstruktionsgedanken in etwas geänderter Form verwenden, indem man Blechstücke in Winkel-, Bogen- oder Kastenform bringt und sie in die Ecken der Flanschen und Stegbleche an allen

Seiten so einschweißt, daß ein allseitig geschlossener Hohlraum entsteht. In den Abb. 37—40 sind derartige in Winkel- und Bogenform gebogene Aussteifungen in Ansicht und Schnitt an einem Doppel-T- und einem Kastenträger und in Abb. 41 im Bild gezeigt. Der Vorteil dieser Aussteifungen gegenüber den üblichen liegt in der besseren Aufnahmefähigkeit für Scherkräfte in der größeren Steifigkeit sowie in der Vermeidung tiefer Ecken, die leicht der Verschmutzung bzw. Rostbildung ausgesetzt sind.

bei sehr dicken Wandstärken als Winkelstoß (vgl. Abb. 26—28) ausgeführt werden.

In Abb. 42 sind verschiedene Ausführungsformen für Eckversteifungen an Rahmeneckverbindungen zusammengestellt. Unten rechts ist durch gestrichelte Linien eine Ausführungsform angedeutet, bei der man die Versteifungsbleche vor dem Festschweißen leicht nach innen biegt. Durch die Schweißwärme schrumpfen bekanntlich die Schweißraupen sowie auch die Bleche (vgl. Versuch Abb. 21); die vor dem Schweißen

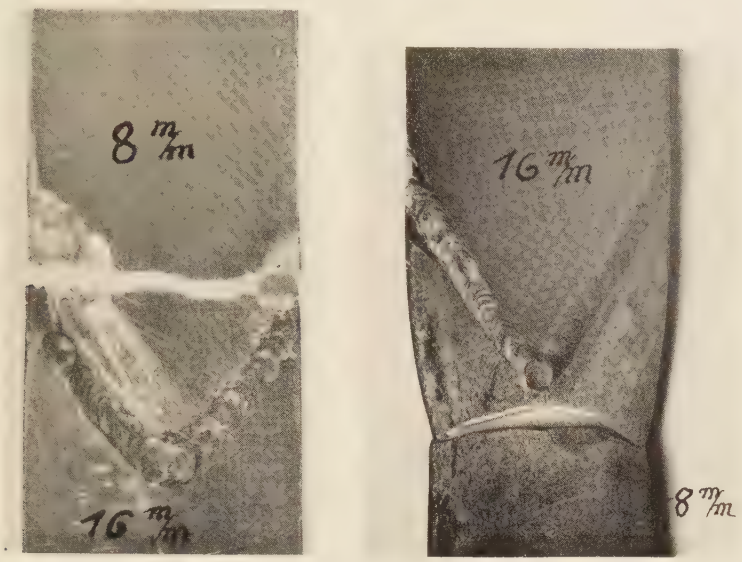


Abb. 28.

Die Abb. 35—40 geben einen Vergleich zwischen genieteten und geschweißten Doppel-T- und Kastenprofilen größerer Abmessungen. Die Konstruktionen der genieteten Profile (Abb. 35, 36), die für die Zusammensetzung der Ober- und Untergurte mehrere Blech-

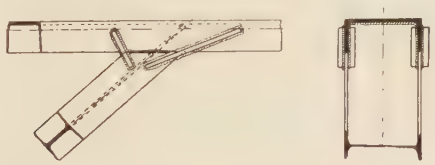


Abb. 29.

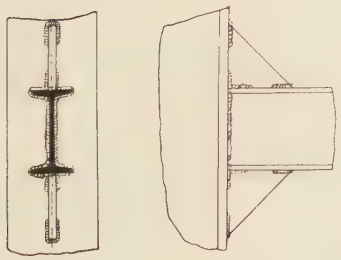


Abb. 30.

lagen erfordern, wirken recht schwerfällig im Vergleich zu den geschweißten Ausführungen nach Abb. 37 bis 40. Bei diesen sind die mehrfachen Blechlagen der Nietverbindungen an Ober- und Untergurten durch je ein dickes Blech ersetzt. Die Verbindung der Gurtbleche untereinander kann mit ausreichender Sicherheit auch gebogenen Bleche können sich strecken und ergeben nun spannungsfreie Verbindungen. Abb. 42 zeigt ferner zwei verschiedene Ausführungen zum Anschluß von Deckenträgern an eine Säule. Man erhält hier ein anschauliches Bild von der Einfachheit und Geschlossenheit der geschweißten Konstruktion, besonders wenn man mit Abb. 43 vergleicht, wo die gleiche Rahmenecke in genieteter Ausführung in Ansicht und Zeichnung dargestellt ist.

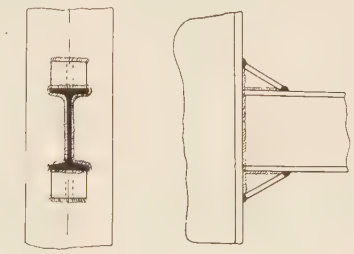


Abb.31.

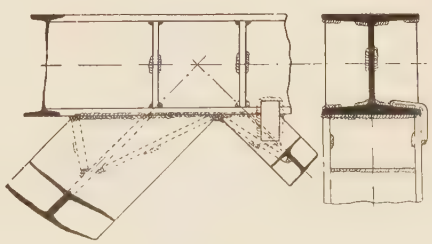


Abb. 32.

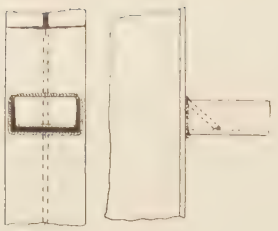


Abb. 33.

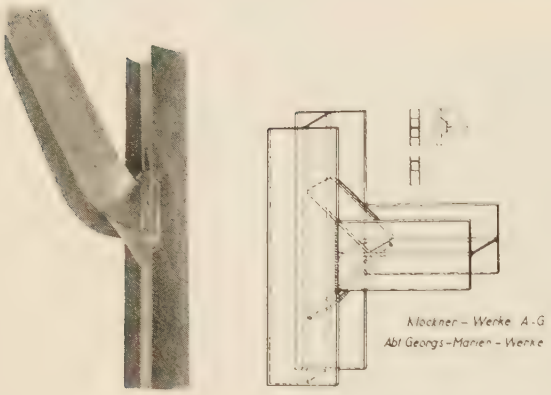


Abb. 34.

Bekanntlich ist das Rohr das günstigste Profil für Knickstäbe. Man hat dies Profil bei Eisenkonstruktionen bis jetzt deshalb wenig angewendet, weil seine Verbindung durch Nieten Schwierigkeiten machte, und weil die Rohre im Verhältnis zu anderen Profilen teurer waren. Erst die Schweißtechnik hat hier neue Möglichkeiten geschaffen, indem durch sie die Rohrherstellung wesentlich verbilligt und die einfache und zweckmäßige Verbindung der Rohre zu ganzen Konstruktionen ermöglicht wurde; auch können die Stahlrohre mit beliebigen Profilen verschweißt werden. Es sind schon verschiedene Stahlrohrkonstruktionen in geschweißter Ausführung hergestellt worden, bei denen die Rohre direkt miteinander oder unter Zuhilfenahme von Knotenblechen verschweißt wurden [34]) [35]). Die Verwendung von Knotenblechen ermöglicht wohl zuverlässige Verbindungen; die Konstruktion hat aber den Nachteil, daß sie keine große Seitensteifigkeit besitzt, und daß sie erst eines Zwischengliedes, eben des Knotenbleches, bedarf (Abb. 44). Außerdem ist diese Herstellung umständlich und teuer; die Rohre müssen eingeschlitzt und die Knotenbleche zugeschnitten werden, nach dem Zusammenheften der Verbindung müssen die Rohrenden mit dem autogenen Schweißbrenner angewärmt und durch Hämmern an das Knotenblech herangedrückt werden, damit eine dichte Verschweißung möglich ist. Dies ist nötig, weil sonst Feuchtigkeit in das Innere der Rohre dringen könnte.

Aus all diesen Gründen ist eine direkte Verschweißung der Rohre vorzuziehen, wobei zur Sicherung der Schweißung hochkant gebogene Flach- oder auch Rundstäbe entsprechend Abb. 45 übergeschweißt werden können. Die Versteifungsstäbe werden zweckmäßig, wie die Abbildung angibt, in der Richtung der Zugstreben gelegt. Solche Anordnung gewährleistet die denkbar größte Festigkeit und Steifigkeit nach allen Seiten. Abb. 46 zeigt die geschweißte Verbindung von Rohren mit T-Profil; auch hier wird wieder eine Verstärkung und Sicherung durch hochkant angeschweißte Flacheisen erreicht.

Bei vielen Forschungsstellen hat man nach konstruktiven Mitteln gesucht, die in der Lage sind, die Schwingungsfestigkeit von Schweißverbindungen zu steigern. Da sich Kehlnahtverbindungen an Überlappungen und Laschungen besonders ungünstig verhielten, wurden hierüber zahlreiche Untersuchungen angestellt [37]) [38]) [39]). Man hat den Laschen und Überlappungen verschiedene Formen gegeben, sie eckig, spitz und rund gemacht und sie mit allmählich abnehmender Wanddicke ausgebildet. Endlich hat man noch an den Laschen oder auch an den Kehlnähten der Laschenenden runde Aussparungen angefräst. Diese Maßnahmen haben mehr oder weniger Erfolg gehabt.

Abb. 35.

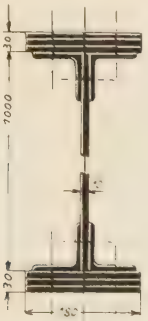


Abb. 37.

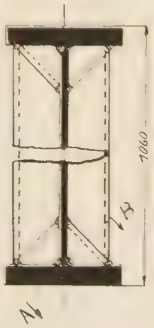
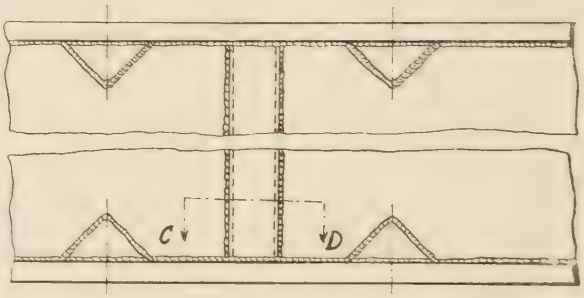


Abb. 39.



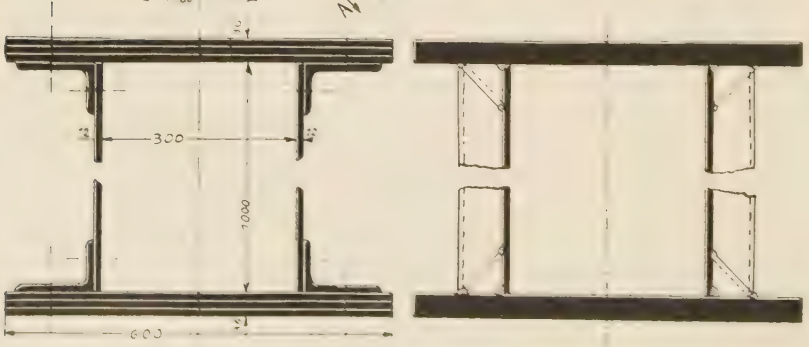


Abb. 36.

Abb. 38.

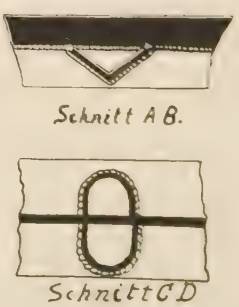


Abb. 40.

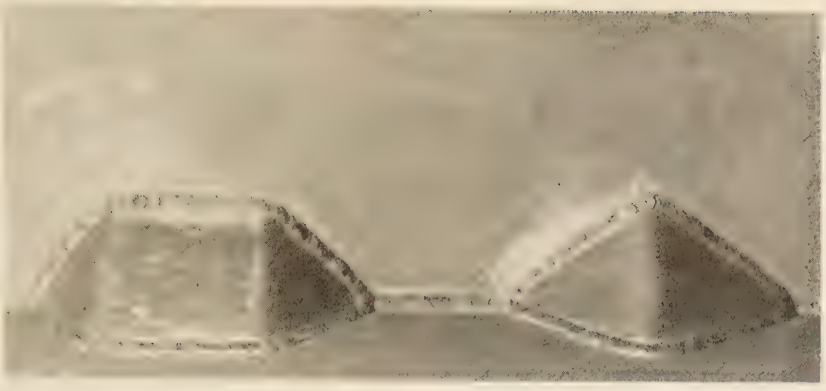


Abb. 41.

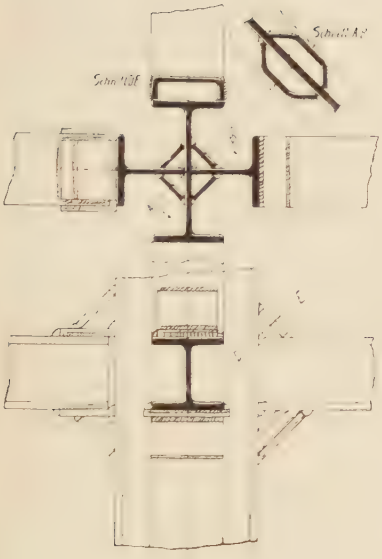


Abb. 42.

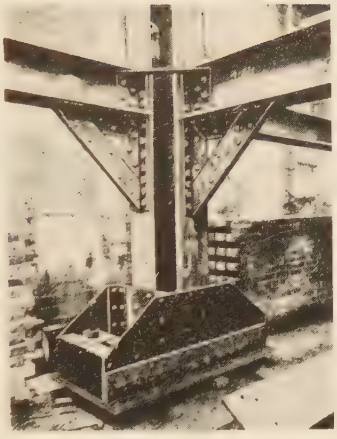


Abb. 43.

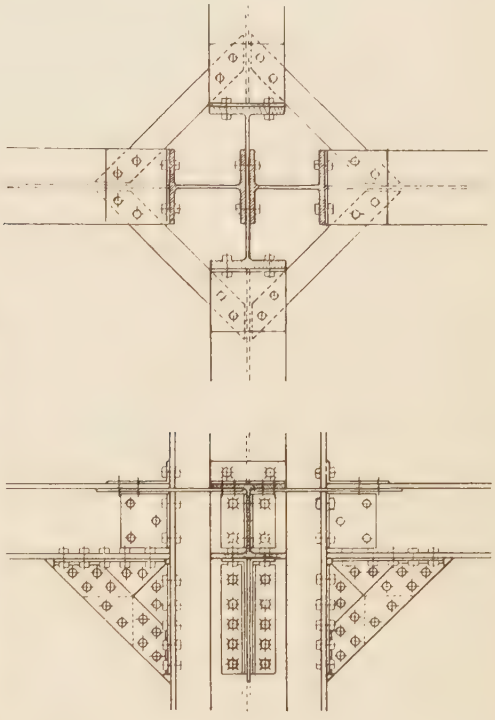


Abb. 44.

Abb. 45.

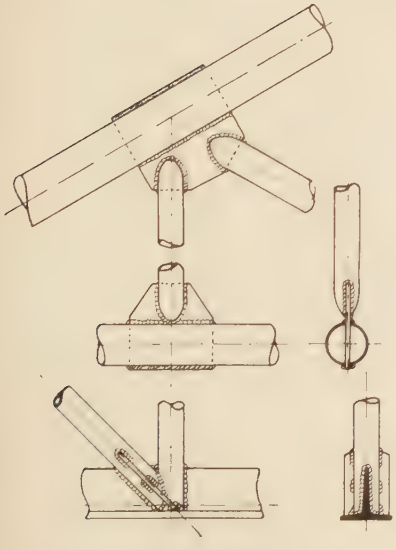


Abb. 46.

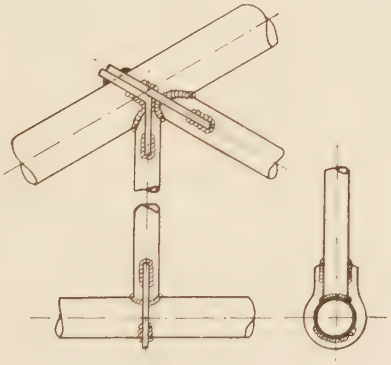
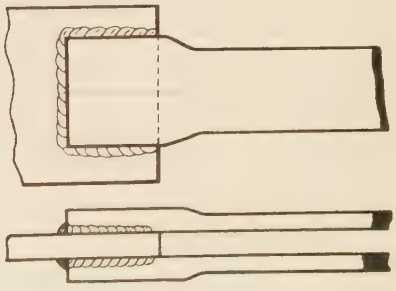


Abb. 47.

Abb. 48.



Einen besonders glücklichen Erfolg hat der Verfasser damit erzielt, daß er die Enden der zu verschweißenden Profile aufstauchte und dann verschweißte. Bei stumpfgestoßenen Verbindungen, wie z. B. eine aus Rundstäben in Abb. 47 gezeigt ist, wurde im Dauerschlagwerk die gleiche Dauerfestigkeit in der Schweiße und im gesunden Werkstoff festgestellt. Der Schweißquerschnitt war gleich dem Stabquerschnitt gewählt worden, der Bruch trat immer außerhalb des Knotens im unveränderten Werkstoff ein. Ein gleicher Versuch mit ungeschweißten, sonst gleichen Stäben ergab etwa dieselben Dauerschlagzahlen bis zum Bruch.

Ähnlich verhielten sich Laschenverbindungen nach Abb. 48, bei denen die Laschenenden aufgestaucht und diese verdickten Enden durch Kehlnähte angeschweißt wurden.

Es hat sich herausgestellt, daß die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen dann wesentlich gesteigert wird, wenn die bei jeder Dauerbeanspruchung zu leistende Formänderungsarbeit von der Schweißstelle weg mit allmählichem Querschnittsübergang zu einem möglichst homogenen und elastischen Konstruktionsteil geleitet wird.

Schluß.

Im Laufe der technischen Entwicklung hat man erkannt, daß der Schwingungsfestigkeit der Baustoffe besondere Bedeutung zukommt. In dem Bestreben, die Schwingungsfestigkeiten unter den verschiedensten Bedingungen und mit möglichster Genauigkeit zu ermitteln, hat man zahlreiche Versuche angestellt, die aber vielfach sehr irreführende Ergebnisse brachten, womit große Unruhe und Unsicherheit unter den Konstrukteuren hervorgerufen wurde. Besonders wurde davon der Schweißkonstrukteur betroffen; denn die verschiedenen Dauerfestigkeitsuntersuchungen wurden vor allem an Schweißverbindungen vorgenommen, weil die Schweißung das jüngste und meist umstrittene Gebiet der Technik ist.

Die vorliegende Arbeit wollte zeigen, daß es oft nicht leicht ist, die Zeichen von Laboratoriumsversuchen richtig zu deuten, und daß es einer gründlichen Erforschung der konstruktiven Besonderheiten bei Schweißverbindungen sowie eingehender Erfahrung bedarf, um die Schweißtechnik wirtschaftlich anwenden zu können.

Literaturverzeichnis.

Zeitschriften.

„Die Schmelzschweißung", Zeitschrift des Verbandes für autogene Metallbearbeitung. 1924—1932.
„Die Elektroschweißung", Zeitschrift für die Gebiete der elektrischen Schweißverfahren.
„Werft — Reederei — Hafen."
„Der Bauingenieur."
„Der Stahlbau."
„Die autogene Metallbearbeitung."
„VDI-Zeitschrift."
„Stahl und Eisen."
„Elektrotechnische Zeitschrift."
„Maschinenbau."
„Journal of the American Welding-Society."
„Engeneering."
„The Iron-Age."

Bücher.

Meller, Elektrische Lichtbogenschweißung.
Schimpke-Horn, Praktisches Handbuch der gesamten Schweißtechnik.
Diskussionsberichte Nr. 5, 6 und 19 der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt der E. T. H., Zürich.
Gesammelte Vorträge der Werkstofftagung Berlin 1927 der Gruppe Stahl und Eisen.
„Ausgewählte Schweißkonstruktionen" Bd. 1: Stahlbau; Bd. 2: Maschinenbau; Bd. 3: Rohrleitungs- und Behälterbau; Bd. 4: Fahrzeugbau.
Bardtke, Gemeinfaßliche Darstellung der gesamten Schweißtechnik.
Lefring, Einfluß der Schweißstrombedingungen bei der elektrischen Lichtbogenschweißung von weichem Flußstahl.
Baumgärtel, Untersuchungen über den Einfluß von Umwicklungen der Schweißstäbe auf die mechanischen Festigkeitseigenschaften der Schweiße.
Haas, Wege zur Berechnung der Festigkeit von lichtbogengeschweißten Verbindungen auf Grund der Erfahrungen der Praxis und der Ergebnisse von Versuchen.
Arcos-Gesellschaft, Handbuch für die Ausführungen geschweißter Stahlbauten.
Jahrbuch der Schiffsbautechnischen Gesellschaft Jahrgänge 1928 und 1929.
Denkschrift des Fachausschusses für Schweißtechnik beim VDI 1929.
Kommerell, Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten.
Berichte vom 1. Internationalen Schweißtechnischen Kongreß für Dampfkesselbau im Haag 1931.
Schaper, Grundlagen des Stahlbaus. 6. Aufl. Berlin 1933.

Verzeichnis der Literaturhinweise.

[1]) Journal of the American Welding Society Nov. 1930, Jan. 1932, März 1932.

[2]) Journal of the American Welding Society April 1932, Sept. 1932.

[3]) „Elektroschweißung" 1932 S. 1, 41, 116, 128.

[4]) a) ZVDI 1932 S. 121.
b) „Stahlbau" 1932 S. 52.

[5]) a) „Elektroschweißung" 1932 S. 108, 181.
b) ZVDI 1932 S. 293.

[6]) a) ZVDI 1931 S. 859.
b) ZVDI 1932 S. 497.

[7]) ZVDI 1930 S. 1423: Bartels, Die Dauerfestigkeit ungeschweißter und geschweißter Guß- und Walzwerkstoffe.

[8]) ZVDI 1931 S. 972: Garre und Gerbes, Drehschwingungsfestigkeit von geschweißtem Flußstahl.

[9]) a) Monthl. Bull. Coll. Washington 11, 1930, Nr. 11.
b) Engg. Bull. No. 34, Engg. Exp. Stat.

[10]) Journal of the American Welding Society Okt. 1930, Dez. 1930, Okt. 1931.

[11]) Journal of the American Welding Society Dez. 1931.

[12]) a) Ludwik und Scheu, „Stahl und Eisen" 1923 S. 999.
b) K. Daeves, „Elektroschweißung" 1931 S. 121.

[13]) Forschungsarbeiten Heft 329: Memmler und Laute, Dauerversuche an der Hochfrequenz-Zug-Druck-Maschine, Bauart Schenck.

[14]) ZVDI 1931 S. 1479: Tafel und Viehweger, Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf den Formänderungswiderstand.

[15]) a) ZVDI 1930 S. 1125: Beißner und Kuchel, Dauerfestigkeit geschweißter Stahlrohrverbindungen.
b) ZVDI 1930 S. 1561: Hoffmann, Dauerfestigkeit geschweißter Stahlrohrverbindungen.
c) „Elektroschweißung" 1932 S. 65: Hoffmann, Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen.
d) „Autogene Metallbearbeitung" 1931 S. 96: Baumgärtel, Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen.
e) ZVDI 1931 S. 954: Beißner, Einfluß der Gasschmelzschweißung auf die Biegungs-Schwingungsfestigkeit von Cr-Mo-Stahlrohren.

[16]) ZVDI 1931 S. 705: Thum, Zur Frage der Sicherheit in der Konstruktionslehre.

[17]) a) Graf, Dauerfestigkeit von Stählen mit Walzhaut, ohne und mit Bohrung, von Niet- und Schweißverbindungen. VDI-Verlag 1931.
b) ZVDI 1932 S. 438: Graf, Versuche mit Nietverbindungen bei oftmals wiederholter Belastung.
c) „Bautechnik" 1932 Heft 30, 32: Graf, Dauerversuche mit Schweißverbindungen.
d) „Stahlbau" 1932 S. 177: Graf, Aus Dauerversuchen mit Lichtbogenschweißungen.
e) „Stahlbau" 1932 Heft 9: Schächterle, Dauerversuche mit Nietverbindungen.
f) „Bautechnik" 1932 Heft 22, 23: Schächterle, Die Nietverbindung.
g) „Bautechnik" 1932 S. 590, 603: Schächterle, Die zulässigen Spannungen bei genieteten und geschweißten Brücken.

[18]) „Stahlbau" 1932 S. 161: Dörnen, Zug-Druck-Dauerversuche mit niedriger Frequenz der Kraftrichtungswechsel.

[19]) ZVDI 1930 S. 329: Schrenck, Aufbau und Einzelheiten deutscher Leichtmotorenflugzeuge.

[20]) ZVDI 1932 S. 1141: Scholz, Motorenfundamente auf Schiffen.

[21]) „Elektroschweißung" 1931 Heft 2 u. 3: Sandelowsky, Die Untersuchung von Elektroden für die elektrische Lichtbogenschweißung.

[22]) „Elektroschweißung" 1931 Heft 1: Haas, Berechnung und Festigkeit lichtbogengeschweißter Verbindungen.

[23]) Timoshenko, Schwingungsprobleme der Technik. Berlin, Verlag Julius Springer, 1932.

[24]) a) „Maschinenbau" 1931 S. 727: Bernhard, Neuere dynamische Messungen im Brückenbau.
b) ZVDI 1932 S. 348: Späth, Schwingungs-Prüfmaschinen für Sonderzwecke.

[25]) Memmler und Laute, Dauerversuche an der Hochfrequenz - Zug - Druck - Maschine. Forschungsarbeiten Heft 329 S. 25.

[26]) a) Vorschriften für geschweißte Stahlbauten.
b) Kommerell, Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten. Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1931.

[27]) „Elektroschweißung" 1932 S. 181: Burckhardt, Die Entwicklung der elektrischen Schweißung im Schiffbau.

[28]) „Bautechnik" 1932 S. 613: Reinhold und Heller, Die Schrumpferscheinungen an der elektrisch geschweißten Schlachthofbrücke in Dresden.

[29]) „Elektroschweißung" 1930 S. 205; ZVDI 1930 S. 1340: Lottmann, Über Schrumpfspannungen und deren Beachtung beim Lichtbogenschweißen.

[30]) „Elektroschweißung" 1932 S. 169: Schröder, Elektrisch geschweißter Stahlbau für die Güterschuppen- und Rampenanlage in Gütersloh.

[31]) ZVDI 1930 S. 1755; Gottfeldt, Ausbildung geschweißter Blechträger.

[32]) „Journal of the American Welding Society" Okt. 1932: Hollister und Gelman, Distribution of stresses in welded double butt-strap joints.

[33]) „Journal of the American Welding Society" Dez. 1930: Whitney, Welding field-joints on a fourteen-stories office-building.

[34]) „Schmelzschweißung" 1931 S. 4: Ulbricht, Geschweißte Fachwerkkonstruktionen aus Stahlrohren.

[35]) Hilpert, Werkstofftagung Berlin 1927; Gesammelte Vorträge der Gruppe Stahl und Eisen S. 92.

[36]) „Der Stahlbau" 1932 Heft 26: Schmudde, Das Stahlskelett der Kreuzkirche in Osnabrück-Schinkel.

[37]) „Der Stahlbau" 1933 Heft 11 und 12/13: Graf, Über die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen.

[38]) „Stahl und Eisen" 1933 Heft 21 S. 545: E. H. Schulz und Buchholz, Die Dauerfestigkeit von genieteten und geschweißten Verbindungen aus St 52.

[39]) ZVDI 1933 S. 493: Thum und Schick, Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen bei verschiedener Formgebung.

Großbetrieb für Dissertationsdruck Robert Noske, Borna-Leipzig.

Lebenslauf.

Am 1. September 1895 wurde ich, Karl Ludwig Jurczyk, in Breslau als Sohn des Oberbergamtssekretärs Berthold Jurczyk und seiner Ehefrau Antonie geb. Fischer geboren. Ich bin verheiratet.

Im Dezember 1914 verließ ich die Bender-Oberrealschule in Breslau, die ich bis dahin besucht hatte, um als Kriegsfreiwilliger ins Heer einzutreten. Ich stand 3 Jahre lang als Frontkämpfer auf verschiedenen Kriegsschauplätzen im Felde.

Nachdem ich im Dezember 1918 aus dem Heeresdienst entlassen worden war, begann ich mein Studium an der Technischen Hochschule in Breslau in der Fachrichtung für Maschinen-Ingenieurwesen und Elektrotechnik. Im Dezember 1921 bestand ich an der gleichen Hochschule die Diplom-Hauptprüfung mit Auszeichnung.

Seitdem bin ich berufstätig gewesen, und zwar als technisch-wissenschaftlicher Assistent bei der AEG Turbinenfabrik, Berlin; als Leiter des Konstruktionsbüros bei der Fa. Eduard Ahlborn, Hildesheim; als Betriebs-Chef bei der Borsigwerk Aktiengesellschaft, Borsigwerk/Oberschlesien; vom 1. Juli 1930 an stehe ich als Oberingenieur in den Diensten der Klöckner-Werke AG., Abteilung Georgs-Marien-Werke, Osnabrück.